

**UNIVERSIDAD CARLOS III**  
**INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN**  
**PROYECTO FINAL DE CARRERA**



**“Accesibilidad en los cines:  
Ampliación y mejora de un  
sistema de subtulado  
cerrado”**

*Autor: Alberto Martínez Arroyo*  
*Tutor: José Manuel Sánchez Pena*  
*Director: Pablo Revuelta Sanz*

*Noviembre 2009*



*Sólo está perdido  
quien se da por vencido*



## *Agradecimientos*

Desearía dedicar este proyecto a todas las personas de las que he recibido algún tipo de apoyo en el largo camino que he debido recorrer para llegar hasta aquí. En primer lugar está mi familia, sobre todo mi hermana y mi madre. También incluyo a otros que ya no están, como mi padre quien supongo que se sentiría orgulloso de lo que he conseguido.

Además, me gustaría dar las gracias a Javi y Pablo por todos los consejos que me han dado para afrontar con éxito este proyecto. Una parte de lo que aquí está escrito es suyo.

Tengo que agradecer a Taxi-Talia el haberme recogido con su coche en numerosas ocasiones cuando estaba sólo en plena calle y tenía frío.

Por supuesto, durante todos los años que he estado en la universidad he tenido muchos compañeros y amigos que saben muy bien lo duro que resulta el poder alcanzar este momento. Va por ellos también.

Y, cómo no, no puedo terminar sin mencionar a mis compis de vuelo, en especial a Fran y Egoitz. Con ellos he podido despejarme y divertirme en los momentos más difíciles de la carrera haciendo lo que más me gusta, volar.



# Índice

<b>CONCEPTOS PREVIOS Y ABREVIATURAS.....</b>	<b>9</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>13</b>
1.1 Discapacidad auditiva.....	16
1.2 Las cifras de la sordera en España.....	17
1.3 Soluciones a la discapacidad auditiva.....	19
1.4 Accesibilidad Universal.....	20
<b>2. ESTADO DEL ARTE.....</b>	<b>23</b>
2.1 Subtítulos.....	25
2.2 Reverse Window.....	26
<b>3. OBJETIVOS.....</b>	<b>29</b>
<b>4. TECNOLOGÍA INALÁMBRICA PARA LAS GAFAS.....</b>	<b>37</b>
4.1 Tipos de tecnologías inalámbricas.....	39
4.2 Tecnologías que se adaptan mejor a nuestra aplicación.....	41
4.3 Criterios de selección.....	42
4.4 Wi-Fi.....	43
4.5 Bluetooth.....	49
4.6 ZigBee.....	54
4.7 Comparación de prestaciones.....	58
4.8 Conclusiones y elección de la tecnología inalámbrica.....	60
<b>5. ELECCIÓN DEL KIT DE DESARROLLO ZIGBEE.....</b>	<b>63</b>
5.1 Criterios de evaluación.....	65
5.2 PICDEM Z Demonstration kit.....	65
5.3 Silicon Labs 802.15.4-2.4-DK.....	67
5.4 OKI ZigBee Developers Kit.....	69
5.5 CC2430DK Development Kit.....	71
5.6 ZIGBIT Kit.....	73
5.7 RCM4510W Development kit.....	74
5.8 Comparación de prestaciones.....	76
5.9 Conclusiones y elección del kit.....	79
<b>6. ELECCIÓN DE LA TARJETA DE VIDEO.....</b>	<b>81</b>
6.1 DECADENET BOB-4.....	84
<b>7. HEAD-MOUNTED DISPLAY.....</b>	<b>87</b>
7.1 SCALAR TELEGLASS T3-F.....	90
<b>8. TEXAS INSTRUMENTS CC2430.....</b>	<b>93</b>
8.1 Consideraciones previas sobre el CC2430DK.....	95
8.2 Análisis en detalle del SoC CC2430.....	96
8.3 SmartRF04EB.....	107
8.4 Z-Stack.....	111
<b>9. DISEÑO SOFTWARE Y ALGORITMOS DEL PROTOTIPO.....</b>	<b>117</b>
9.1 Afrontando el problema.....	119
9.2 Formato de los datos que se envían por el aire.....	121
9.3 Diseño Software del Servidor.....	121
9.4 Diseño Software del enlace ZigBee.....	127

<b><u>10. CARACTERÍSTICAS, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO.....</u></b>	<b><u>131</u></b>
10.1 Características.....	133
10.2 Diseño del circuito impreso.....	134
10.3 Construcción del prototipo.....	136
<b><u>11. PRUEBAS Y RESULTADOS.....</u></b>	<b><u>139</u></b>
11.1 Resultados académicos.....	142
<b><u>12. PLANIFICACIÓN DEL TRABAJO Y PRESUPUESTO.....</u></b>	<b><u>143</u></b>
12.1 Planificación del trabajo.....	145
12.2 Presupuesto.....	147
12.3 Conclusiones.....	148
<b><u>13. CONCLUSIONES.....</u></b>	<b><u>149</u></b>
<b><u>14. MEJORAS FUTURAS.....</u></b>	<b><u>155</u></b>
14.1 Mejoras Hardware.....	157
14.2 Mejoras Software.....	159
14.3 Otras aplicaciones: Uso combinado de gafas con reconocedores de voz.....	160
<b><u>15. BIBLIOGRAFÍA.....</u></b>	<b><u>163</u></b>



# CONCEPTOS PREVIOS Y ABREVIATURAS

- ADC: Convertidor de señal analógica a digital.
- AES: Estándar de encriptación avanzado.
- AF: Framework de aplicación. Es el entorno en donde se alojan los APOs.
- API: Aplicación de interfaz de programación.
- APL: Capa de aplicación. Está dividida en 3 partes: AF, ZDO y APS.
- APO: Objeto de aplicación. Son definidos por el usuario. Un ejemplo de APO puede ser una entrada digital.
- APS: Subcapa de apoyo a aplicación. Proporciona servicio de transferencia de datos a los APO y ZDO.
- ASOCIACIÓN: El servicio suministrado por la subcapa MAC IEEE 802.15.4 que es utilizado para establecer relaciones de agrupamiento en una red.
- ATRIBUTO: Una entidad de datos que representa una cantidad física o estado.
- BEACON-ENABLED PAN: Una red de área personal que contiene como mínimo un dispositivo que transmite tramas baliza a un intervalo regular.
- BPSK: Modulación binaria por desplazamiento de fase.
- BROADCAST: Transmisión de un mensaje a todos los dispositivos de una red.
- CLÚSTER: Un contenedor para uno o más atributos.
- COORDINADOR ZIGBEE: Controlador principal basado en IEEE 802.15.4 que es responsable de la formación y el mantenimiento de la red (asociar y desasociar dispositivos, etc.). El coordinador ZigBee debe ser del tipo FFD.
- CRC: Cyclic Redundancy Check. Control de redundancia cíclica.
- CSMA-CAN: Acceso múltiple por detección de portadora con evasión de colisión.
- DESASOCIACIÓN: El servicio suministrado por la subcapa MAC IEEE 802.15.4 que es utilizado para terminar la relación dentro de un grupo de un dispositivo en una red.
- DIRECCIÓN DE RED: La dirección asignada a un dispositivo utilizada por la capa de red por encaminar mensajes entre dispositivos.

- **DIRECCIONAMIENTO INDIRECTO:** Capacidad de algunos dispositivos para comunicarse sin saber la dirección del destino deseado. Las transmisiones indirectas sólo tendrán que incluir el campo de la dirección del punto final junto con el bit de Direccionamiento Indirecto y serán direccionadas hacia el Coordinador ZigBee por la fuente. Cuando reciba el mensaje el Coordinador ZigBee buscará el destino/punto final/clúster ID de la fuente dentro de su tabla de vínculos y reenviará el mensaje a la dirección/punto final/destino correspondiente.
- **DMA:** Acceso directo a memoria.
- **DSSS:** Direct-Sequence Spread Spectrum. Espectro ensanchado por secuencia directa. Técnica empleada por ZigBee.
- **ED (END DEVICE):** Un dispositivo final RFD o FFD IEEE 802.15.4 participante en una red ZigBee, el cual no es ni un coordinador ZigBee ni un router ZigBee.
- **EP (END POINT):** Punto Final, un componente particular dentro de una unidad. Cada dispositivo ZigBee puede soportar hasta 240 de estos componentes.
- **FFD (FULL-FUNCTION DEVICE):** Un dispositivo con capacitado de operar como coordinador o router e implementa el protocolo completo de ZigBee.
- **HAL:** Capa de abstracción hardware.
- **IDE:** Ambiente de desarrollo integrado.
- **IDENTIFICADOR DE CLÚSTER:** Es un único número de 8 bits dentro del ámbito de la aplicación e identifica un clúster específico. Los identificadores de clúster son asignados como entradas o salidas en el descriptor simple para utilizarse en la creación de una “binding table” (tabla de vinculación).
- **IF:** Frecuencia intermedia.
- **LNA:** Amplificador de bajo ruido.
- **MAC:** Control de acceso al medio.
- **MCU:** Unidad microcontroladora.
- **MISO:** Master In Slave Out.
- **MOSI:** Master Out Slave In.
- **NODO:** Una colección de descripciones y aplicaciones de un dispositivo independiente todo ello situado en una sola unidad y disponiendo de capacidad radio que cumple el estándar 802.15.4.

- NWK: Capa de red.
- OSAL: Capa de abstracción de sistema operativo.
- PERFIL: Una colección de descripciones de dispositivo, las cuales todas juntas forman una aplicación cooperativa. Por ejemplo, un interruptor en un nodo se comunica con una lámpara en otro nodo. Todos juntos, forman de manera cooperativa un perfil de aplicación de iluminación.
- PHY: Capa física.
- POR: Power On Reset. Proporciona una correcta inicialización durante la puesta en marcha del dispositivo.
- QPSK: Modulación en cuadratura por desplazamiento de fase.
- RED MESH: Una red en la cual el encaminamiento de mensajes se realiza como un proceso descentralizado y cooperativo.
- RF: Radio frecuencia.
- RFD (REDUCED FUNCTION DEVICE): Un dispositivo de la red con una implementación mínima del protocolo ZigBee.
- ROUTER ZIGBEE: Es un FFD integrado en una red ZigBee, el cual no es un coordinador ZigBee pero puede actuar como un coordinador IEEE 802.15.4 dentro de su propio espacio de operación, que tiene capacidad de encaminar mensajes entre dispositivos.
- SFR: Registro de función especial.
- SoC: Sistema en un chip. Un término colectivo utilizado por referirse a los circuitos integrados de Texas Instruments con transmisor RF y MCU en el chip.
- TRANSMISIÓN DIRECTA: Transmisión de una trama utilizando direccionamiento directo.
- UART: Receptor/transmisor asíncrono universal.
- UNICAST: La transmisión de un mensaje a un único dispositivo en una red.
- USART: Receptor/transmisor síncrono/asíncrono universal.
- ZIGBEE DEVICE OBJECT (ZDO): La parte de la capa de aplicación responsable de definir el rol del dispositivo dentro de una red (por ejemplo, coordinador ZigBee o dispositivo final), iniciando y/o respondiendo a consultas de vinculación y descubrimiento y estableciendo relaciones seguras entre dispositivos de red.



# CAPÍTULO 1

---

## *Introducción*

*1.1 Discapacidad auditiva*

*1.2 Las cifras de la sordera en España*

*1.3 Soluciones a la discapacidad auditiva*

*1.4 Accesibilidad Universal*



# 1. INTRODUCCIÓN

El objeto de este proyecto de fin de carrera es el diseño y construcción de un prototipo de gafas inalámbricas de subtítulo cerrado en cines. Dicho sistema está pensado para que sea empleado por gente que tenga problemas de audición y mejorar así la accesibilidad de este tipo de salas.

De esta forma, aunque estas personas no puedan escuchar correctamente los diálogos de una película, empleando este dispositivo podrán seguir la trama más fácilmente. Al mismo tiempo puede ser utilizado por otros colectivos, como por ejemplo gente cuya lengua materna sea distinta a la de la película mostrando los subtítulos en su idioma y permitiéndoles de esta forma integrarse.

Hay que destacar que estas gafas de subtítulo son la continuación natural de los trabajos realizados por investigadores pertenecientes al Centro Español de Subtitulado y Audiodescripción (CESyA) en colaboración con el GDAF (Grupo Display y Aplicaciones Fotónicas) de la Universidad Carlos III a cargo de José Manuel Sánchez Pena.

Este grupo de investigadores llegó a desarrollar y construir un prototipo. Este prototipo era funcional y contenía la esencia, la idea, de subtitular una película utilizando unas gafas.

Sin embargo, a pesar de ser considerado exitoso algunos aspectos eran mejorables. Este proyecto de fin de carrera busca precisamente desarrollar un nuevo sistema de gafas que mejore varias de las prestaciones de aquel prototipo inicial.

Por ejemplo, en ese prototipo se empleaba un protocolo propietario para transmitir de forma inalámbrica los subtítulos desde la estación principal hasta las gafas de subtítulo. Una de las mejoras propuestas para ese prototipo consistirá en sustituir ese protocolo propietario por una tecnología inalámbrica mucho más extendida y común.

Si bien con este proyecto final de carrera no se pretende alcanzar una solución definitiva al problema del subtítulo, sí se desea dar un paso adelante en el largo camino que aún queda por recorrer en temas de accesibilidad.

Para poder entender y explicar el porqué de la existencia de un proyecto como el descrito anteriormente hay que hablar sobre varias cosas, principalmente: Qué es la discapacidad auditiva y cómo la sociedad actual y, más concretamente, un colectivo perteneciente a ésta se ve afectado por ella.

## *1.1 La discapacidad auditiva*

La sordera en cuanto a deficiencia, se refiere a la pérdida o anormalidad de una función anatómica y/o fisiológica del sistema auditivo, y tiene su consecuencia inmediata en una discapacidad para oír, lo que implica un déficit en el acceso al lenguaje oral.

Los problemas de audición provocan situaciones de aislamiento en quienes los padecen, sobre todo si son niños. En este sentido, los conocimientos se adquieren a través del lenguaje oral de forma natural, de modo que quien nace sordo y no se le ayuda no desarrolla la inteligencia de la misma manera que otra persona que no tenga este problema.

Partiendo de que la audición es la vía principal a través de la cual se desarrolla el lenguaje y el habla, debemos tener presente que cualquier trastorno en la percepción auditiva de los niños, a edades tempranas, va a afectar a su desarrollo lingüístico y comunicativo, a sus procesos de conocimiento, de conducta y, consecuentemente, a su posterior integración escolar, social y laboral [1].



Figura 1.1: Logo internacional para la sordera

En función del momento de aparición, del tipo y del grado de las mismas las pérdidas auditivas pueden clasificarse:

Según el momento de adquisición:

- Sordera prelocutiva: La pérdida auditiva está presente antes de que se haya desarrollado el lenguaje.
- Sordera postlocutiva: La pérdida auditiva aparece cuando ya existe lenguaje.

Según la localización de la lesión:



- De conducción o de transmisión: Presentan alteraciones en la transmisión del sonido a través del oído externo y medio.
- De percepción o neurosensorial: Es debida a lesiones en el oído interno o en la vía nerviosa auditiva.
- Mixta: La causa es conductiva y de percepción.

Según el grado de pérdida auditiva:

- Pérdidas leves: El umbral de audición está situado entre 20 y 40 dB.
- Pérdidas medias: La pérdida auditiva se encuentra entre 41 y 70 dB.
- Pérdidas severas: La pérdida auditiva se sitúa entre los 71 y 90 dB.
- Pérdidas profundas: En este caso la pérdida auditiva supera los 90 dB y se sitúa entre 91-100 dB.

La mayoría de los casos de pérdida auditiva o sordera no son evitables. El único tipo que puede prevenirse es la pérdida auditiva inducida por el ruido<sup>1</sup>. Por ello se pueden tomar medidas para reducir el riesgo de padecer este tipo de sordera.

## *1.2 Las cifras de la sordera en España*

Como ya se ha comentado, la pérdida auditiva es un problema que afecta a la calidad de vida de las personas y a sus relaciones sociales, aislándolas de su entorno.

A pesar del impacto que supone en la vida diaria de los afectados, existe una escasa concienciación del problema y mucha gente que todavía puede oír de una forma aceptable se muestra reacia a tomar medidas preventivas e incluso personas que ya perciben una degradación de su capacidad auditiva rehúsan hacerse revisiones del oído.

Por ejemplo, el Instituto Valenciano de la Sordera-GAES en España denuncia que “únicamente” el 50 por ciento de la población se ha hecho alguna vez algún tipo de prueba para conocer su nivel auditivo [2].

Los expertos también alertaron de un incremento de problemas de audición entre los más jóvenes debido, entre otros factores, al uso de reproductores de música a niveles altos. Por ello pronosticaron que los chicos y chicas de nuestro país tendrán a la edad de sus padres los problemas de audición que ahora mismo padecen sus abuelos.

---

<sup>1</sup> La intensidad del sonido se mide en decibelios y cualquier sonido que supere los 80 dB está considerado peligroso cuando nos exponemos a él de forma prolongada. Se incluyen entre estos la música, las sirenas y los motores ruidosos.

Según datos de la encuesta sobre discapacidades realizada en 2008 por el Instituto Nacional de Estadística (INE), el número de discapacitados auditivos asciende a 1.064.200 personas mayores de 6 años, lo que supone un 2,52% del total de la población como se expone en la Tabla 1.1. Por sexos, el número de mujeres con discapacidad auditiva es mayor que el de hombres.

Hay que resaltar que las tasas de discapacidad en mujeres comienzan a ser superiores a las de hombres a partir de los 45 años de edad. En todos los tramos inferiores a los 45 años la tasa de discapacidad en hombres es mayor a la de mujeres.

Además, el porcentaje de personas con problemas auditivos va aumentando con la edad, de tal manera que a partir de los 55 años, cerca del 50 por ciento de la ciudadanía tiene algún tipo de pérdida auditiva.

Ambos sexos		Varones		Mujeres	
Nº de personas	Tasa por 100	Nº de personas	Tasa por 100	Nº de personas	Tasa por 100
455.700	2,19	608.500	2,84	1.064.200	2,52

Tabla 1.1: Discapacitados visuales y auditivos mayores de 6 años en España

A esta cifra, referida a personas de más de 6 años de edad, habría que sumar los 68.000 niños y niñas de 6 años o menos que también tienen algún tipo de discapacidad auditiva (Tabla 1.2).

Niños	Niñas	Total
37.000	31.000	68.000

Tabla 1.2: Discapacitados visuales y auditivos menores de 6 años en España

La encuesta sobre discapacidades también realiza dentro de la categoría de discapacidad auditiva divisiones en función del tipo específico de discapacidad:

Tipo de discapacidad	Ambos sexos	Varones	Mujeres
Audición	1.064.200	455.700	608.500
Recibir cualquier sonido	65.700	30.300	35.400
Audición de sonidos fuertes	392.300	161.800	230.500
Escuchar el habla	969.400	409.600	559.800

Tabla 1.3: Número de discapacitados por tipo de discapacidad

Se proporciona también en la Tabla 1.4 el número de personas con discapacidad en función de su deficiencia de origen.

Tipo de discapacidad	Ambos sexos	Varones	Mujeres
Deficiencias de oído	907.000	387.000	520.000
Sordera prelocutiva	19.300	10.500	8.700
Sordera postlocutiva	39.000	16.100	22.900
Mala audición	830.000	353.500	476.600

Tabla 1.4: Tasa de discapacitados por tipo de discapacidad por cada 1000 habitantes

### *1.3 Soluciones a la discapacidad auditiva*

Dependiendo del tipo de pérdida auditiva que se padece, las consecuencias que tiene la sordera sobre el desarrollo comunicativo y lingüístico de la persona variarán y condicionarán la orientación y el tratamiento audioprotésico y rehabilitador.

Este tratamiento será necesario aplicarlo en cada caso con el objeto de que la persona con discapacidad auditiva pueda desarrollar con mayor facilidad y de manera más natural todas sus capacidades y habilidades cognitivas, comunicativas y lingüísticas, y acceder a mejores opciones vocacionales, laborales, educativas y de ocio.

Dependiendo de si la persona ha nacido sorda o si perdió la audición más adelante tras haber aprendido a oír y hablar, los médicos determinarán qué tipo de terapia necesitará esa persona para aprender a usar por ejemplo un implante con eficacia. Muchas personas con implantes aprenden a oír sonidos con normalidad e incluso usan el teléfono.

Para las personas que pierden la audición tras aprender a hablar y oír, la adaptación puede ser difícil porque oír ha sido un aspecto esencial de su comunicación y sus relaciones. Las nuevas tecnologías están haciendo posible que haya más jóvenes sordos que estudien y participen en actividades con compañeros que sí pueden oír.

El tratamiento de la sordera depende de la causa de dicha deficiencia. Si existen daños o algún problema estructural en el tímpano o en los huesecillos del oído, la cirugía puede ayudar a corregirlo. Si el problema está en el oído interno o en el nervio auditivo, puede que se aconseje el uso de audífonos o la utilización de un implante coclear.

Los audífonos pueden ser de varios tipos, se ajustan en el interior o detrás del oído y hacen que los sonidos se oigan más altos y más claros. Los ajusta un audiólogo de modo que el sonido que llega se intensifique lo suficiente como para permitir que la persona lo oiga con claridad. A veces, la sordera es tan grave que ni el audífono más potente puede amplificar el sonido lo suficiente. En tales casos, puede que se recomiende la utilización de un implante coclear.

Los implantes cocleares son dispositivos implantados quirúrgicamente que bordean el oído interno dañado y envían las señales directamente al nervio auditivo. Detrás del oído, un pequeño micrófono capta las ondas sonoras y las envía a un receptor que se ha colocado bajo el cuero cabelludo. Dicho receptor transmite los impulsos

directamente al nervio auditivo. Las señales son percibidas como sonidos y hacen que la persona oiga.

Otras tecnologías disponibles, además de las ya mencionadas, son los sistemas FM que incluyen un micrófono/transmisor para el maestro y un receptor para el estudiante, los videos subtitulados en tiempo real y los distintos software de reconocimiento de voz, que pueden ser de ayuda para, por ejemplo, tomar apuntes.

En casa, suelen ser útiles los dispositivos como los televisores con subtítulos, las luces que se encienden de forma intermitente cuando suena el timbre de la puerta o los teléfonos con pantallas de lectura digital.

Con estas soluciones, si bien se consigue una mejora significativa, desafortunadamente nunca se logrará una recuperación total de la capacidad auditiva pero lo que se pretende realmente es la integración y la vida autónoma. Es por ello que hay que seguir mejorando lo existente y al mismo tiempo ir buscando nuevas alternativas que sustituyan o complementen estos sistemas.

## *1.4 Accesibilidad Universal*

Durante mucho tiempo el concepto de accesibilidad hacía referencia únicamente a las mejoras en los entornos físicos como la eliminación de barreras arquitectónicas. Este concepto ha evolucionado y actualmente se entiende por accesibilidad un extenso conjunto de medidas muy diversas que deben ser tenidas en cuenta de modo que la accesibilidad sea universal o integral.

Esta idea de accesibilidad universal significa que un entorno es plenamente accesible cuando todos los caminos de ese entorno son accesibles. Esto quiere decir que una persona con discapacidad no tenga que ver interrumpida o dificultada la realización de sus actividades porque uno de los caminos, un entorno o espacio, no es accesible y no le permite avanzar en su recorrido de forma autónoma.

En España, la regulación sobre accesibilidad se contiene básicamente en la Ley 51/2003, de igualdad de oportunidades, no discriminación y accesibilidad universal y en las normas que la desarrollan, donde se regulan las condiciones básicas de accesibilidad en cada uno de sus ámbitos de intervención: telecomunicaciones y sociedad de la información, espacios públicos urbanizados, infraestructuras y edificación, transportes, bienes y servicios a disposición del público y relaciones con las Administraciones públicas.

También en desarrollo de dicha ley, el I Plan Nacional de Accesibilidad 2004-2012 tiene como objetivo principal alcanzar la accesibilidad universal de todos los entornos, productos y servicios para superar las barreras que discriminan a las personas con discapacidad [3].

Se realizan actividades a favor de las personas con discapacidad a través del Centro de Referencia Estatal de Autonomía Personal y Ayudas Técnicas (CEAPAT), del Centro de Intermediación Telefónica, del Centro Español de Subtitulado y

Audiodescripción (CESyA) y del Centro Nacional de Tecnologías de Accesibilidad (CENTAC) entre otros.

También para facilitar la accesibilidad existe un convenio entre el Ministerio de Sanidad y Política Social y la Confederación Estatal de Personas Sordas (CNSE), cuyo objeto es hacer posible que las personas sordas dispongan de los servicios de intérpretes de lengua de signos, para aquellas gestiones o eventos en los cuales una persona sorda usuaria de la lengua de signos lo necesite para su comunicación.

Estas personas pueden contar con intérpretes de lengua de signos en situaciones comunes como ir al médico, hacer gestiones en un banco, realizar trámites en Hacienda, recibir la asesoría de un abogado o acudir a una conferencia.



# CAPÍTULO

## 2

---

### *Estado del arte*

#### *2.1 Subtítulos*

#### *2.2 Reverse Window*





## 2. ESTADO DEL ARTE

### *2.1 Subtítulos*

Los subtítulos son palabras que se muestran en cualquier tipo de pantalla, como por ejemplo en una de televisión, y que describen una porción de audio o sonido de una película o un programa.

Los subtítulos pueden estar en diferentes idiomas y, al mismo tiempo, permiten a los espectadores sordos o con problemas de audición seguir el diálogo y la acción de una escena. También proporcionan información acerca de quién está hablando o efectos de sonido que quizá sean importantes para comprender una noticia, un suceso político o la trama de una película.

Los subtítulos se crean a partir de la transcripción de una película o un programa. Un transcriptor separa el diálogo en los subtítulos y se asegura de que las palabras aparezcan sincronizadas con el audio que describen. Es necesario un software especialmente diseñado para codificar la información de los subtítulos y combinarla con el audio y el vídeo para crear un nuevo archivo digital del programa.

#### *2.1.1 Subtítulos en tiempo real*

Los subtítulos en tiempo real se crean según van sucediendo los eventos. Un transcriptor (a menudo un taquígrafo experto) usa una máquina de estenotipia con un teclado fonético y un programa especial. Un ordenador traduce los símbolos fonéticos a subtítulos casi instantáneamente. El leve retraso se produce por la necesidad del transcriptor de oír la palabra y en el tiempo de procesamiento del ordenador.

Los subtítulos en tiempo real se pueden usar en los programas que no tienen ningún guión como sucesos en directo, incluidas las reuniones de un congreso o los programas de noticias.

Aunque casi la totalidad de los subtítulos en tiempo real son exactos, ocasionalmente, la audiencia observará algunos errores. El transcriptor podría escuchar mal una palabra, oír una palabra con la cual no está familiarizado o el diccionario del programa podría contener algún error.

A menudo, los subtítulos en tiempo real se producen en un lugar diferente al de la programación y se transmiten por una vía diferente. Además de los subtítulos en tiempo real, se usan subtítulos en vídeos pregrabados, DVDs y en cintas educacionales y de entrenamiento que aunque usan un proceso similar, permiten la corrección de errores.

### ***2.1.2 Subtítulos abiertos o cerrados***

Atendiendo al modo de mostrar los subtítulos existen dos tipos de sistemas de subtitulado:

- Abiertos: Cuando el subtitulado no es una opción sino que todo el mundo ve los subtítulos en una pantalla.
- Cerrados: Cuando existe la posibilidad de activar o desactivar los subtítulos de tal forma que sólo las personas que lo necesitan o lo desean ven los subtítulos.

Ambos sistemas de subtitulado son válidos ya que cumplen con su principal misión que es que las personas con discapacidad auditiva puedan seguir la trama de una película.

A pesar de esto, hay que tener presente que el subtitulado en abierto tiene un efecto negativo en las personas que no lo necesitan, interfiriendo directamente en la forma en que estas personas ven la película por varios motivos:

- El primer motivo sería porque si los subtítulos están en la pantalla ocultan parte de la imagen.
- La segunda razón es que los subtítulos consiguen distraer con gran facilidad al espectador quien, en muchas ocasiones, leerá el subtítulo sin necesitarlo.

Por estas causas y porque las personas tienen el derecho a disfrutar de una película de cine en igualdad de condiciones, el subtitulado cerrado es la opción preferida, siendo la mejor solución a aplicarse en las salas de cine.

## ***2.2 Reverse Window***

Reverse Window es una característica de CSS (Cinema Subtitling System), un sistema de subtitulado desarrollado por la empresa DTS. Con ella se pueden proporcionar subtítulos a asientos específicos en una sala de cine. Como se puede ver en la Figura 2.1, los subtítulos son mostrados en un formato de texto en espejo sobre una pantalla electrónica en la parte trasera del cine.

Los asientos seleccionados tienen cada uno una pantalla en frente de ellos. La parte superior es transparente, permitiendo a la persona ver la película, mientras que la parte inferior es plateada por lo que actúa como un espejo y refleja el texto del subtítulo proyectado desde la parte trasera de la sala.

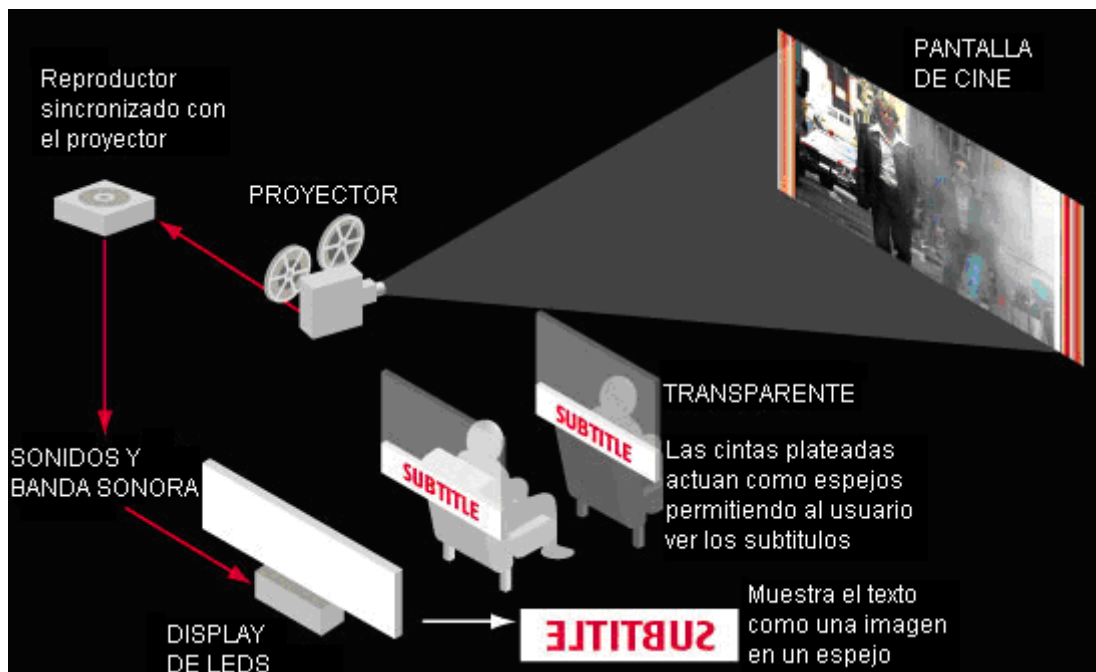


Figura 2.1: Subtitulado de las películas empleando Reverse Window

Sin embargo, a pesar del gran avance que representa el Reverse Window, los colectivos de personas sordas están preocupados por el hecho de que este sistema pueda marginarlos a un área específica dentro del cine. El sistema funciona pero la gente discapacitada siente que con los espejos captan excesivamente la atención del resto de público, algo que a algunos de ellos les resulta incómodo.

Otro punto negativo del Reverse Window es que los usuarios deben sentarse detrás de un espejo y deben estar en la posición correcta para ver los subtítulos por lo que deben permanecer prácticamente inmóviles en sus asientos.



# CAPÍTULO

## 3

---

### *Objetivos*



### 3. OBJETIVOS

La misión de este proyecto final de carrera, tal y como ya se comentó en la introducción, es el diseño y construcción de unas nuevas gafas de subtítulo cerrado para proporcionar accesibilidad en los cines, mejorando ciertos aspectos de un prototipo anteriormente creado.

Este proyecto puede dividirse en dos partes claramente diferenciadas:

- Parte Hardware: Relacionada con el diseño del circuito, que comprende el diseño, elaboración y construcción del circuito receptor que lleva consigo el usuario.
- Parte Software: Programa principal de ejecución en el servidor, código de programa del receptor, etc.

Para saber qué aspectos pueden ser objeto de mejora conviene conocer primero algunas de las características más importantes de ese prototipo inicial [4] [5]:

- El prototipo empleaba un visor del tipo monóculo montado en unas gafas de cristales transparentes similares a las de la Figura 3.1.



Figura 3.1: Gafas empleadas en el anterior prototipo

- Disponía de un microcontrolador 8051 de Silicon Labs encargado de controlar todas las tareas de recepción de subtítulos y control de la tarjeta de video del equipo que porta el espectador. La placa hija que contenía esta MCU estaba acoplada y soldada al resto de componentes.
- Estaba dotado de una tarjeta de video DECADENET BOB-4H encargada de generar la imagen que contiene los subtítulos.

- Usaba un sistema de comunicación vía radio de la empresa Easy Radio. Era capaz de transmitir a una velocidad de 19200 bps con capacidad máxima para atender a la vez hasta a 8 usuarios transmitiendo 4 idiomas diferentes.

Una vez descritas las características más relevantes es muy importante resaltar que, si bien la parte fundamental del proyecto son las gafas de subtítulo cerrado, se ha aprovechado para ampliar la idea y desarrollar un sistema global de subtítulo válido para ser exportado a salas de cine. La arquitectura propuesta para este proyecto final de carrera es la que aparece en la Figura 3.2.



Figura 3.2: Arquitectura propuesta para el proyecto

Como se puede ver, el sistema consta de un servidor con una base de datos con subtítulos, una máquina encargada del subtítulo de la sala, una aplicación en el sistema de proyección de la película y gafas de subtítulo conectadas de forma inalámbrica para cada usuario. La máquina encargada del subtítulo de la sala se descarga los subtítulos de la película que se vaya a visionar usando una conexión TCP que tiene establecida con el servidor.

El servidor puede recibir nuevos ficheros de subtítulo de las propias productoras de películas a través de Internet o por medio de otras fuentes, como pueden ser asociaciones de subtítulo. Es obvio que si este sistema va a emplearse en una sala



de cine los subtítulos deben haber pasado algún tipo de control previo por parte de una entidad que dé garantías de que son correctos, por lo que a priori no sería válida cualquier fuente de procedencia.

A su vez, la máquina en la que corre la aplicación de envío de subtítulos a las gafas recibe constantemente el tiempo de reproducción de la película mediante otra conexión TCP. De esta manera los subtítulos se pueden enviar a las gafas de los espectadores en el momento preciso.

El sistema además debe ser capaz de proporcionar subtítulos a varios usuarios al mismo tiempo y en diferentes idiomas. Un ejemplo de uso podría ser el de la Figura 3.3, donde el espectador situado a la izquierda visionase los subtítulos en castellano y el de la derecha en inglés.

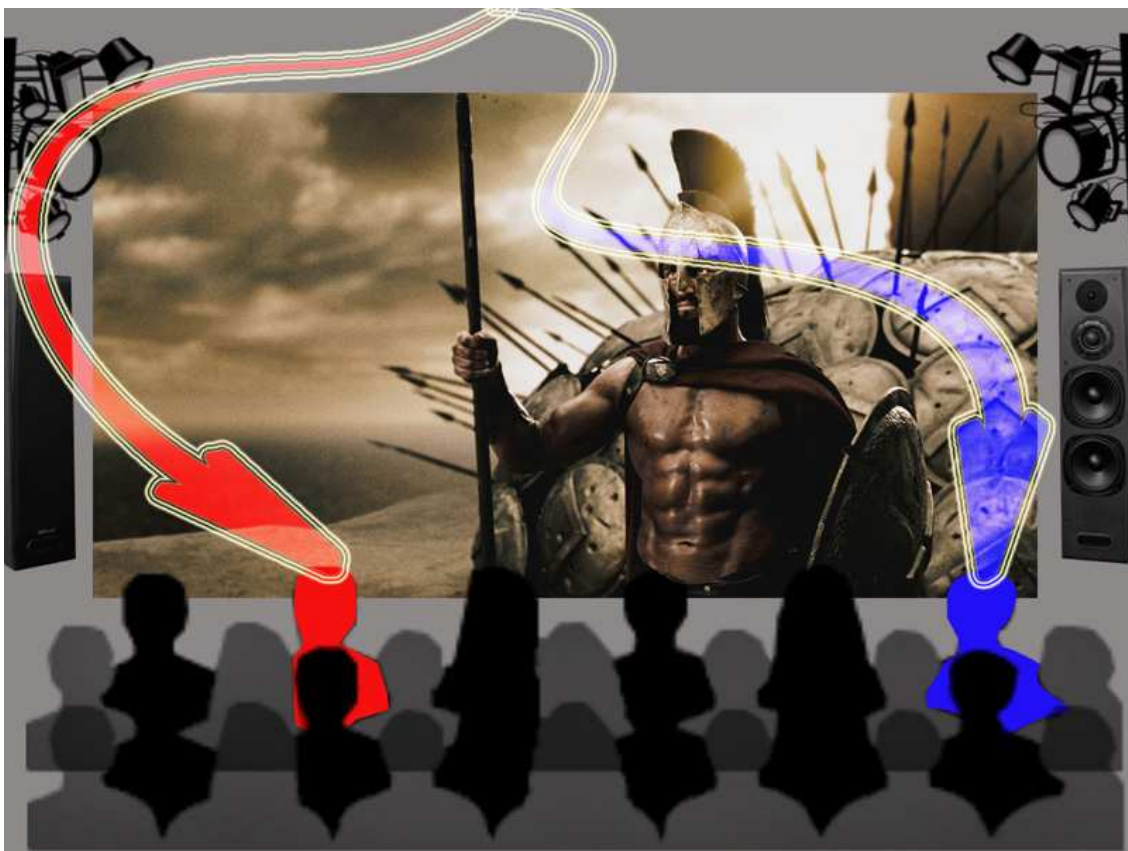


Figura 3.3: Ejemplo de uso del sistema en una sala de cine

Para mejorar algunas características de las gafas y diseñar todo el sistema descrito anteriormente, los pasos a seguir son los siguientes:

- **Estudio del estado del arte de tecnologías inalámbricas y elección de la mejor de ellas para el subtitulado cerrado en cines.**

Con este estudio, se pretende obtener información relevante acerca de qué tecnología puede ser más idónea para la aplicación de accesibilidad en el cine. Así, se deberán comparar las distintas tecnologías en relación a:

- Cobertura.
- Consumo.
- Interferencias, principalmente las producidas por otros sistemas idénticos.
- Precio.
- Frecuencia de trabajo.
- Ancho de banda.
- Protocolo de control y comunicación.
- Tamaño de los módulos teniendo en cuenta que en última instancia, será un usuario quien deba llevarlo.

Además, habrá que tener en cuenta que la estación base también necesitará un transceptor de dicha tecnología, pudiendo darse el caso de que la comunicación sea, eventualmente, bidireccional.

El juego de caracteres que permita la comunicación también es un punto importante pues, si se puede, sería conveniente dejar la puerta abierta a futuras implementaciones en alfabetos no latinos.

- **Estudio de mercado de dispositivos inalámbricos según la elección de la tecnología inalámbrica.**

En función de la tecnología elegida como la más conveniente buscaremos un dispositivo para conectar en el circuito del dispositivo cliente y otro para el servidor. Se valorará:

- Tipo de MCU integrada en los módulos.
- Interfaz de comunicación (existencia de puerto serie y número de pines I/O).
- Tamaño del módulo.
- Voltaje de alimentación.
- Precio.
- Software de desarrollo incluido en el kit.

- **Estudio de mercado de Tarjetas de Vídeo.**

La tarjeta de vídeo es una parte muy importante del dispositivo receptor ya que es la encargada de generar una señal de vídeo compuesto (NTSC/PAL) a partir de los paquetes de información recibidos por el servidor. Esta señal de vídeo se mostrará a través de las gafas que queramos conectar. Por ello las características que hay que tener en cuenta en cuanto la tarjeta de vídeo son:

- Resolución.
- Consumo.
- Interfaz puerto serie.
- Tamaño de letra/número de caracteres por línea.

- Caracteres en color (si dispone de esa opción).
  - Precio.
- **Diseño de circuito e implementación en Protoboard y diseño del software de los microcontroladores empleados tanto por el receptor como por el servidor.**

Sobre la base de lo discutido en los estudios anteriores, así como de los trabajos anteriormente desarrollados, se elaborará un prototipo sobre una placa protoboard para verificar su funcionamiento. Para ello, se necesitará programar el microcontrolador, así como la estación base, sobre las versiones disponibles.

- **Diseño e implementación del circuito en PCB.**

Una vez probada la funcionalidad del circuito en Protoboard, habrá que diseñar un circuito en PCB, optimizando el tamaño. La funcionalidad deberá ser la misma que el prototipo anterior.

- **Pruebas y resultados.**

Sobre el prototipo en PCB, se deberían realizar pruebas de comprobación tanto de puntos técnicos como de otra índole que afectan al usuario (comodidad de uso, interfaz sencilla de manejar, etc.). Posteriormente se discutirán los resultados y se propondrán mejoras futuras.



# CAPÍTULO

## 4

---

### *Tecnología inalámbrica para las gafas*

*4.1 Tipos de tecnologías inalámbricas*

*4.2 Tecnologías que se adaptan mejor a nuestra aplicación*

*4.3 Criterios de selección*

*4.4 Wi-Fi*

*4.5 Bluetooth*

*4.6 ZigBee*

*4.7 Comparación de prestaciones*

*4.8 Conclusiones y elección de la tecnología inalámbrica*



## 4. TECNOLOGÍA INALÁMBRICA PARA LAS GAFAS

El término "inalámbrico" hace referencia a la tecnología sin cables que permite conectar varias máquinas entre sí. Actualmente, la tecnología inalámbrica forma parte de nuestra vida cotidiana al estar asociada a los sectores de las telecomunicaciones y la informática personal, estando presente en todo tipo de equipos móviles o fijos.

Este tipo de conexiones se realizan usando ondas de radio (principalmente en la banda ISM de 2.4 GHz) u ondas infrarrojas (las longitudes de onda más típicas son 1.330 nm o 1.550 nm). Tienen ventajas como la rápida instalación de la red sin la necesidad de usar cableado, permiten la movilidad y tienen menos costes de mantenimiento que una red convencional.

Entre los usados más comúnmente se incluye a IrDA, el estándar que define las comunicaciones empleando rayos infrarrojos, y las redes inalámbricas de dispositivos electrónicos.

La amplia difusión y crecimiento de las tecnologías inalámbricas ha ido acompañada por un crecimiento similar en términos de número de terminales móviles. Esta fuerte expansión ha permitido simplificar bastante las tareas cotidianas, así como mejorar el bienestar de los ciudadanos.

Los dispositivos móviles actuales suelen disponer de diferentes interfaces inalámbricas que permiten maximizar su flexibilidad de uso, lo que permite realizar llamadas o conectarse a Internet desde la mayor parte de los núcleos urbanos, así como desde parte de los núcleos rurales.

Gracias a todos estos avances ahora se pueden plantear proyectos como el que nos ocupa, el desarrollo de unas gafas de subtulado para sordos que funcionen mediante un enlace inalámbrico y que serían usadas en salas de cine, todo ello a un coste razonable.

Hay que destacar que las ondas de radio de baja potencia, como las que se emplean para transmitir información entre dispositivos a distancias cortas, por lo general no tienen regulación. En cambio las transmisiones de alta potencia radioeléctrica requieren normalmente de un permiso del Estado para poder transmitir en una frecuencia específica.

### *4.1 Tipos de tecnologías inalámbricas*

Dependiendo de su alcance, las diferentes tecnologías inalámbricas se pueden clasificar en los siguientes tipos:

#### ***4.1.1 Redes Inalámbricas de Área Personal (WPAN)***

Estas redes tienen un alcance de unos pocos metros y como dice su nombre son para uso personal. Tienen como finalidad la comunicación entre dispositivos (ordenadores, teléfonos móviles, PDAs, impresoras, ratones, equipos de música, etc.) cercanos al punto de acceso.

Dentro de la categoría WPAN las tecnologías más relevantes que tendríamos serían:

- IrDA

El principio de esta tecnología se encuentra en la utilización de rayos luminosos situados en la banda de infrarrojos para la transmisión de información entre dos extremos a velocidades de hasta 4 Mbps. Su principal inconveniente es que debe existir visión directa entre transmisor y receptor para que la comunicación sea posible.

- Bluetooth

Es la especificación recogida en el IEEE 802.15.1 que define un estándar global de comunicaciones inalámbricas para redes de área personal que permite la transmisión de voz y datos entre diferentes aparatos mediante un enlace de radiofrecuencia. Su frecuencia de trabajo está en el rango de 2.4 GHz de la banda ISM.

- ZigBee

Esta tecnología está basada en la especificación IEEE 802.15.4 y se emplea en aplicaciones como la domótica y la automatización industrial, donde se requieren comunicaciones seguras con tasas bajas de transmisión de datos y maximización de la vida útil de sus baterías, o lo que es lo mismo, muy bajo consumo. Al igual que Bluetooth, trabaja a una frecuencia de 2.4 GHz.

- Bluetooth ULP (Ultra Low Power)

Es una tecnología de radio diseñada para tener muy bajo consumo, un alcance máximo de 10 metros y una tasa de hasta 1Mbps. Se centra en comunicaciones de baja potencia y coste entre teléfonos móviles y pequeños dispositivos de sensores.

El inconveniente es que tal y como está definido no es compatible con los estándares actuales de Bluetooth. No estará disponible hasta principios de 2010. Algunas de las soluciones que aparecerán incluirán un módulo dual (Bluetooth ULP/Bluetooth) incluyendo ambas especificaciones. De esta manera se garantizará que tanto los dispositivos viejos como los nuevos puedan ser capaces de mantenerse en contacto. Bluetooth ULP no soporta redes de malla algo de lo que sí es capaz ZigBee [6].



- HomeRF

Es un estándar para conectar todos los teléfonos móviles de la casa y los ordenadores mediante un aparato central en cada casa. Transporta voz y datos por separado y también emplea la frecuencia de 2.4 GHz.

#### ***4.1.2 Redes Inalámbricas de Área Local (WLAN)***

Son sistemas de comunicación de datos flexibles, muy utilizados como alternativa a las redes LAN cableadas (Ethernet) o como extensión de éstas. Son muy populares para compartir el acceso a Internet entre varios ordenadores. Debido a que poseen un alcance superior a las WPAN, pueden llegar donde el cable no puede, superando un mayor número de obstáculos.

La tecnología más conocida de este tipo de redes es la Wi-Fi que está basada en el estándar IEEE 802.11, existiendo variantes de la misma. La banda de frecuencias que emplea está en 2.4 GHz y/o en 5 GHz dependiendo de la versión.

#### ***4.1.3 Redes Inalámbricas de Área Metropolitana (WMAN)***

Poseen un mayor alcance que las WLAN de hasta varios kilómetros. En su mayoría están basadas en WiMax, un estándar regido por la norma IEEE 802.16 de interoperabilidad mundial para acceso mediante microondas. WiMax es un protocolo similar a Wi-Fi pero con una cobertura y un ancho de banda mayores.

#### ***4.1.4 Redes Inalámbricas de Área Amplia (WWAN)***

Estas redes son capaces de abarcar grandes superficies mediante la construcción de una red de celdas. Son empleadas para comunicar puntos separados más de 1000 kilómetros de distancia por lo que pueden dar servicio a un país o a un continente. Aquí tendrían cabida sistemas como GSM o UMTS (Universal Mobile Telecommunications System), este último utilizado en los teléfonos móviles de tercera generación. Son muy útiles en áreas donde el cableado no es posible o es muy costoso como por ejemplo en zonas de difícil acceso como montañas.

### ***4.2 Tecnologías que se adaptan mejor a nuestra aplicación***

Tras un primer análisis de las principales tecnologías inalámbricas disponibles podemos darnos cuenta que nuestra zona de operación, una sala de cine, se asemejaría bastante con una WPAN o una WLAN. De todas las tecnologías englobadas en WPAN y WLAN las posibles opciones que a priori casarían mejor con nuestras gafas son Wi-Fi (IEEE 802.11), Bluetooth (802.15.1) y ZigBee (IEEE 802.15.4) teniendo en cuenta su distancia máxima de operación.

Otras soluciones inalámbricas quedarían descartadas como por ejemplo Bluetooth ULP, debido a su corto alcance de menos de 10 metros y que aún no está disponible, o la tecnología IrDA (comunicación por infrarrojos) puesto que necesita una línea de visión directa para comunicarse, lo que es un gran handicap para el tipo de aplicación en que se usaría.

Por lo tanto, se realizará un estudio de las prestaciones de Wi-Fi, Bluetooth y ZigBee y posteriormente una comparación entre todas para ver cuál de ellas es la más adecuada para nuestro fin. Estas tres tecnologías tienen muy buenas prestaciones, cuentan con gran apoyo por parte de las principales compañías multinacionales, por lo tanto se les augura un buen futuro, y poseen un perfil que se puede adaptar a nuestras necesidades.

### *4.3 Criterios de selección*

Para dotar de movilidad sin cables a las gafas de subtítulo dentro de la sala de cine es necesario comparar de una forma objetiva las tecnologías inalámbricas según una serie de parámetros. Los criterios para tomar la decisión serán:

- Cobertura.
- Consumo.
- Interferencias, principalmente las producidas por otras salas vecinas.
- Precio.
- Frecuencia de trabajo.
- Ancho de banda.
- Protocolo de control y comunicación.
- Tamaño de los módulos teniendo en cuenta que, en última instancia, será un usuario quien deba llevarlo.

### *4.4 Wi-Fi*

Wi-Fi es una de las tecnologías de comunicación inalámbrica más utilizadas hoy en día. Ya se ha mencionado que se basa en el estándar IEEE 802.11 y trabaja a una frecuencia de 2.4 GHz.

Ahora mismo existen tres estándares de transmisión Wi-Fi muy extendidos que son IEEE 802.11a, b y g, aunque principalmente las dos últimas especificaciones son las que se dan de una forma más frecuente.



Figura 4.1: Logo de Wi-Fi

El siguiente paso se dará con la norma 802.11n que sube el límite teórico hasta los 600 Mbps. Actualmente ya existen varios productos que cumplen un primer borrador del estándar 802.11n con un máximo de 300 Mbps (80-100 estables).

Para nuestra aplicación 802.11n estaría claramente sobredimensionado pues tendríamos un exceso de velocidad y de ancho de banda muy grande. Además, al ser la última versión en salir al mercado su precio no es precisamente muy económico. Debido a todo lo comentado anteriormente 802.11n queda descartado directamente y no será objeto de estudio en este trabajo.

#### **4.4.1 Prestaciones**

##### *4.4.1.1 Frecuencia de trabajo*

El estándar 802.11a se basa en la tecnología OFDM (multiplexación por división en frecuencias ortogonales). Transmite en un rango de frecuencia de 5 GHz y utiliza 8 canales no superpuestos. Debido a esto los dispositivos 802.11a son incompatibles con los dispositivos 802.11b dado que 11b funciona a 2.4 GHz.

Por el contrario 802.11g es compatible con los dispositivos 802.11b con excepción de algunos equipos más antiguos ya que ambos trabajan a 2.4 GHz con codificación OFDM.

Al igual que los canales de televisión o las emisoras de radio los emisores están en diferentes canales para evitar interferencias. Los estándares 802.11b y g sólo tienen tres canales diferentes.

Un ejemplo de cómo distribuir estos canales se muestra en la Figura 4.2. Estos se reutilizan una y otra vez, aunque los problemas de interferencias que pueden producir a otras redes vecinas resultan evidentes.

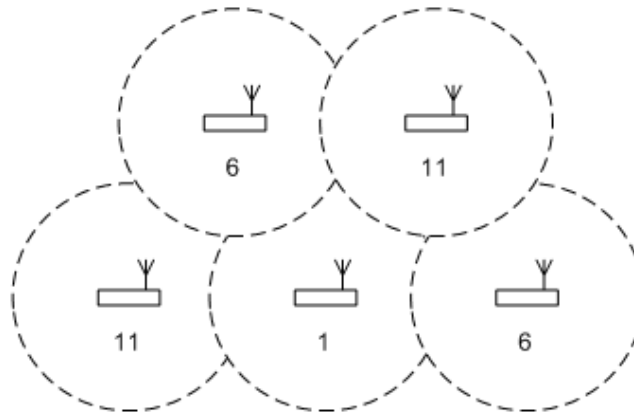


Figura 4.2: Ejemplo de uso de canales en una red Wi-Fi

#### 4.4.1.2 Ancho de banda y alcance

Las Tablas 4.1, 4.2 y 4.3 muestran de forma aproximada las diferentes distancias máximas de empleo para los estándares 802.11a, 802.11b y 802.11g respectivamente [7].

Estas distancias son sólo una estimación puesto que el tipo de antena que empleemos, la sensibilidad de nuestro equipo receptor, la presencia de obstáculos y otra serie de factores pueden hacer que el alcance varíe en gran medida y por lo tanto habría que estudiar cada caso en particular.

802.11a	
Velocidad	Alcance
54 Mbps	10 m
48 Mbps	17 m
36 Mbps	25 m
24 Mbps	30 m
12 Mbps	50 m
6 Mbps	70 m

Tabla 4.1: Tasas de transmisión a diferentes distancias para 802.11a

802.11b		
Velocidad	Alcance en recintos cerrados	Alcance al aire libre
11 Mbps	50 m	200 m
5.5 Mbps	75 m	300 m
2 Mbps	100 m	400 m
1 Mbps	150 m	500 m

Tabla 4.2: Tasas de transmisión a diferentes distancias para 802.11b

802.11g		
Velocidad	Alcance en recintos cerrados	Alcance al aire libre
54 Mbps	27 m	75 m
48 Mbps	29 m	100 m
36 Mbps	30 m	120 m
24 Mbps	42 m	140 m
18 Mbps	55 m	180 m
12 Mbps	64 m	250 m
9 Mbps	75 m	350 m
6 Mbps	90 m	400 m

Tabla 4.3: Tasas de transmisión a diferentes distancias para 802.11g

Las velocidades máximas son de 11 o 54 Mbps pero debido a las cabeceras de los protocolos las velocidades efectivas son aproximadamente la mitad.

Si la señal es demasiado débil para transmitir de forma fiable a la máxima velocidad, los enlaces automáticamente disminuyen la tasa de transmisión incrementando de esta forma la fiabilidad.

Teóricamente el alcance para enlaces b y g funcionando a la misma velocidad debería ser el mismo. En las tablas vemos que no son iguales, aunque sí muy parecidos. Una posible explicación es que esta variación podría deberse a que los equipos b sean de distinto fabricante que los de g y la implementación sea ligeramente diferente, como por ejemplo que los equipos g empleen una antena de mayor ganancia.

Las tablas a su vez ilustran el compromiso existente entre frecuencia y pérdidas por espacio libre. 802.11a trabaja a una frecuencia superior que las versiones 802.11b y 802.11g y es por esta razón que la distancia máxima de funcionamiento es menor. Cuanto menor sea la frecuencia mayor alcance tendremos. Así mismo cuanto menor sea la distancia entre los equipos mayor será la velocidad a la que se puede transmitir.

#### 4.4.1.3 Consumo de energía y potencia de transmisión

En transmisión un sistema típico Wi-Fi requiere de unos 0.6 Watios de potencia y en recepción 0.48 Watios [8]. Cuando está en reposo los equipos Wi-Fi por lo general consumen en torno a 0.03 mW. La máxima potencia de la señal que se transmite puede ser superior a 20 dBm.

#### 4.4.2 Coste

Debido a que esta tecnología está muy extendida su coste es muy asequible. Por ejemplo los chips de la marca Atheros de la versión 11g tienen un precio actual de unos 3 euros aproximadamente [9].

#### 4.4.3 Arquitectura de protocolos

El estándar 802.11 establece los niveles inferiores del modelo OSI para las conexiones inalámbricas que utilizan ondas electromagnéticas, por ejemplo:

- La capa física (PHY) ofrece tres tipos de codificación de información.
- La capa de enlace de datos compuesta por dos subcapas: control de enlace lógico (LLC) y control de acceso al medio (MAC).

En la Figura 4.3 vemos la estructura de la torre de protocolos. La capa física define la modulación de las ondas de radio y las características de señalización para la transmisión de datos mientras que la capa de enlace de datos define la interfaz entre el bus del equipo y la capa física, en particular un método de acceso parecido al utilizado en el estándar Ethernet, y las reglas para la comunicación entre las estaciones de la red.

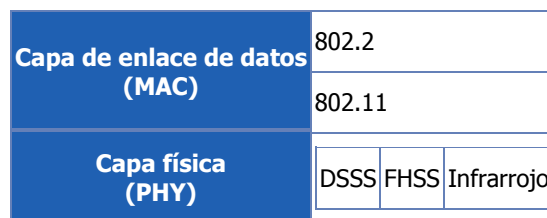


Figura 4.3: Torre de protocolos Wi-Fi

Cualquier protocolo de nivel superior puede utilizarse en una red inalámbrica Wi-Fi de la misma manera que puede utilizarse en una red Ethernet.

#### 4.4.4 Modos de funcionamiento

Existen varias clases de hardware que se pueden utilizar para implementar una red inalámbrica Wi-Fi:

- Los adaptadores inalámbricos o controladores de la interfaz de red son tarjetas de red que cumplen con el estándar 802.11 y que permiten a un equipo conectarse a una red inalámbrica. Los adaptadores inalámbricos están disponibles en diversos formatos, como tarjetas PCI, tarjetas PCMCIA, adaptadores USB y tarjetas Compact Flash. Una estación es cualquier dispositivo que tenga este tipo de tarjetas.
- Los puntos de acceso (AP) pueden permitir a las estaciones cercanas equipadas con Wi-Fi acceder a una red a la que el punto de acceso se conecta directamente.

El estándar 802.11 define dos modos operativos:

- El modo infraestructura en el que los clientes de tecnología inalámbrica se conectan a un punto de acceso. Éste es por lo general el modo predeterminado para las tarjetas 802.11b.
- El modo ad-hoc en el que los clientes se conectan entre sí sin ningún punto de acceso.

#### 4.4.4.1 Modo infraestructura

En el modo de infraestructura, cada estación se conecta a un punto de acceso a través de un enlace inalámbrico. Un ejemplo de modo infraestructura es la Figura 4.4. La configuración formada por el punto de acceso y las estaciones ubicadas dentro del área de cobertura se llama conjunto de servicio básico o BSS. Estos forman una célula. Cada BSS se identifica a través de un BSSID (identificador de BSS) que es un identificador de 6 bytes (48 bits). En el modo infraestructura el BSSID corresponde al punto de acceso de la dirección MAC.



Figura 4.4: Modo infraestructura

Es posible vincular varios puntos de acceso juntos con una conexión llamada sistema de distribución para formar un conjunto de servicio extendido o ESS. El sistema de distribución también puede ser una red conectada, un cable entre dos puntos de acceso o incluso una red inalámbrica.

Un ESS se identifica a través de un ESSID (identificador del conjunto de servicio extendido), que es un identificador de 32 caracteres en formato ASCII y que actúa como su nombre en la red. El ESSID muestra el nombre de la red y de alguna manera representa una medida de seguridad de primer nivel ya que una estación debe saber el SSID para conectarse a la red extendida.

Cuando un usuario va desde un BSS a otro mientras se mueve dentro del ESS, el adaptador de la red inalámbrica de su equipo puede cambiarse de punto de acceso, según la calidad de la señal que reciba desde distintos puntos de

acceso. Los puntos de acceso se comunican entre ellos a través de un sistema de distribución con el fin de intercambiar información sobre las estaciones y, si es necesario, para transmitir datos desde estaciones móviles. Esta característica que permite a las estaciones moverse de forma transparente de un punto de acceso a otro se denomina itinerancia.

#### 4.4.4.2 Modo ad-hoc

En el modo ad-hoc los equipos cliente inalámbricos se conectan entre sí para formar una red punto a punto, es decir, una red en la que cada equipo actúa como cliente y como punto de acceso simultáneamente como se ve en la Figura 4.5. Las soluciones ad-hoc no requieren el uso de routers o puntos de acceso, aunque resulta más complejo su administración para compartir recursos como conexión a Internet, impresoras de red, etc.

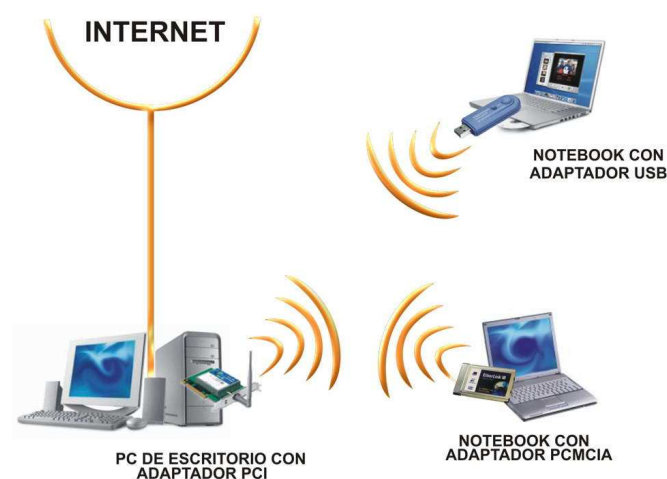


Figura 4.5: Modo ad-hoc

La configuración que forman las estaciones se llama conjunto de servicio básico independiente o IBSS.

Un IBSS es una red inalámbrica que tiene al menos dos estaciones y no usa ningún punto de acceso. Por este motivo el IBSS crea una red temporal que le permite a la gente que esté en la misma sala intercambiar datos. Se identifica a través de un SSID de la misma manera en que lo hace un ESS en el modo infraestructura.

En una red ad-hoc, el rango del BSS independiente está determinado por el rango de cada estación. Esto significa que si dos estaciones de la red están fuera del rango de la otra, no podrán comunicarse, ni siquiera cuando puedan "ver" otras estaciones. A diferencia del modo infraestructura, el modo ad-hoc no tiene un sistema de distribución que pueda enviar tramas de datos desde una



estación a la otra. Entonces, por definición, un IBSS es una red inalámbrica restringida.

## 4.5 Bluetooth

Bluetooth es una especificación abierta basada en el IEEE 802.15.1, estándar que incluye nivel físico (PHY) y nivel de acceso al medio (MAC). Bluetooth describe cómo se pueden interconectar dispositivos como teléfonos móviles, PDA's, ordenadores, cámaras digitales (y muchos otros dispositivos) utilizando una conexión inalámbrica vía radio que no necesita de visión directa entre los dispositivos que se conectan.

Es una tecnología de bajo coste, bajo consumo y corto alcance que posibilita la transmisión de voz y datos entre diferentes dispositivos mediante un enlace por radiofrecuencia segura y globalmente libre trabajando a 2.4GHz.



Figura 4.6: Logo de Bluetooth

Los principales objetivos que los desarrolladores tuvieron en mente cuando Bluetooth fue diseñado fueron:

- La sustitución de los cables para comunicaciones a corta distancia.
- Un sistema universal, capaz de operar en todo el mundo, que facilitase las comunicaciones entre equipos móviles y fijos logrando una interoperabilidad independientemente de su naturaleza.
- Emisor de radio de bajo consumo, integrado en equipos con baterías.
- Sistema de comunicaciones basado en un protocolo robusto y seguro.

Bluetooth ha tenido una larga vida en el mercado y todo parece indicar que la seguirá teniendo durante bastante tiempo. En febrero de 1998, se formó un grupo llamado Bluetooth Special Interest Group (Bluetooth SIG) con más de 200 compañías, dentro de las cuales se encontraban Ericsson, IBM, Intel, Microsoft, Motorola, Nokia y Toshiba.

La primera versión de Bluetooth, la 1.0, nació en el año 1999. Con el paso del tiempo aparecieron nuevas versiones. Bluetooth 1.1 (2001), Bluetooth 1.2 (2003)

Bluetooth 2.0 + EDR (Enhanced Data Rate) (2004) y la última en salir ha sido la versión 2.1 + EDR en el año 2008.

#### **4.5.1 Prestaciones**

##### *4.5.1.1 Frecuencia de trabajo*

La modulación que se emplea es GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying) con un producto ancho de banda por tiempo  $BT=0.5$  [10]. El estándar Bluetooth opera en la banda ISM de 2.4 GHz del mismo modo que Wi-Fi y utiliza la técnica FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum) que consiste en dividir la banda de frecuencia de 2.402 - 2.480 GHz en 79 canales (denominados saltos) de 1 MHz de ancho cada uno y, después, transmitir la señal utilizando una secuencia de canales que sea conocida tanto para la estación emisora como para la receptora. De esta forma Bluetooth puede evitar la interferencia con otras señales de radio.

##### *4.5.1.2 Ancho de banda*

Bluetooth puede funcionar en full dúplex. Cada nueva versión incorpora mejoras como mayores tasas de transmisión. La versión 1.1 de la especificación puede alcanzar 723.1 Kbps. Con la versión 1.2 se pasó a 1 Mbps y en las versiones 2.0 + EDR y 2.1 + EDR se rondan los 3 Mbps.

##### *4.5.1.3 Consumo de energía*

En transmisión los chips Bluetooth requieren de unos 130 mW de potencia eléctrica para transmitir. En reposo necesitan aproximadamente 0.6 mW [11].

##### *4.5.1.4 Alcance y potencia de transmisión*

Hay tres tipos de clases de productos en función de su potencia de emisión:

- Clase 1: Potencia de 100 mW (20 dBm) con un alcance máximo aproximado de 100 metros.
- Clase 2: Potencia de 2.5 mw (4 dBm) con un alcance máximo en torno a los 10 metros.
- Clase 3: Potencia de 1 mW (0 dBm) con un alcance máximo que ronda 1 metro.

#### **4.5.2 Coste**

Los chips Bluetooth son transceptores de corto alcance fabricados principalmente por las compañías CSR, Texas Instruments, Broadcom y Murata entre

otras. El precio de cada chip en el año 2005 era de unos 4 euros mientras que para 2009 se estimaba que el precio bajaría a menos de 2 euros la unidad aunque debido a la actual crisis económica sólo son conjeturas.

#### 4.5.3 Arquitectura de protocolos

La Torre de protocolos de Bluetooth puede verse en la Figura 4.7. Los protocolos en Bluetooth permiten a los diferentes dispositivos comunicarse a través de ciertas normas, tales como la cantidad de datos que serán enviados, el tipo de comunicación entre los dispositivos y las frecuencias en las que esta comunicación se llevará a cabo [12]. Estos protocolos garantizan que los dispositivos Bluetooth experimenten una menor cantidad de interferencias con respecto a otros dispositivos Bluetooth mientras se comunican unos con otros.

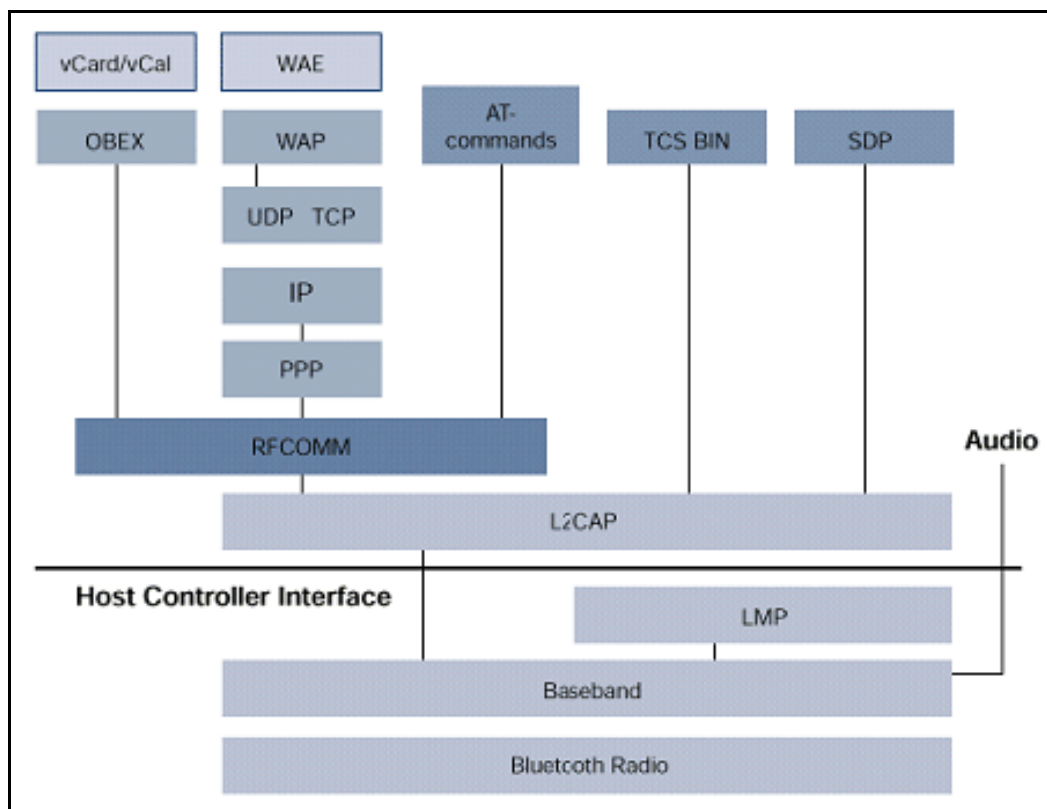


Figura 4.7: Torre de protocolos Bluetooth

La torre de protocolos está compuesta por:

- Interfaz de radio (Bluetooth Radio): Permite el enlace físico por radiofrecuencia entre dispositivos Bluetooth. Realiza tareas de modulación y demodulación de los datos en señales RF que se transmiten por el aire.
- Capa de Banda Base (Baseband): Proporciona los dos tipos de enlace físico:

- Enlace asíncrono sin conexión (ACL) para tráfico de datos.
- Enlace síncrono orientado a conexión (SCO) para tráfico de audio + datos.
- Capa de protocolo de gestión de enlace (LMP): Es responsable de la configuración y control de enlace entre equipos. Cuando dos equipos se encuentran sus gestores de enlace se comunican. También tiene asignada tareas de seguridad como autenticación, cifrado y gestión de claves.
- Capa de interfaz de controlador de Host (HCI): Es la frontera entre las capas de protocolo de hardware y software. Es una capa de acceso homogénea para todos los módulos de cualquier fabricante. Otra de sus tareas es el descubrimiento de dispositivos que se encuentren dentro del radio de cobertura.
- Capa de protocolo de adaptación y control del enlace lógico (L2CAP): Se encarga de la multiplexación de protocolos de nivel superior desde el protocolo de banda base. Realiza la segmentación y recomposición de paquetes antes de su transmisión e intercambia información referente a la calidad del servicio (QoS).
- Capa de protocolo de descubrimiento de servicios (SDP): A través de los servicios dos dispositivos pueden ejecutar aplicaciones comunes e intercambiar datos.
- Capa RFCOM: Es un protocolo de emulación de puerto serie RS-232 sobre L2CAP. Sustituye al cable y emula señales de control y datos proporcionando capacidad de transporte a los niveles superiores.
- Protocolo OBEX: Permite el intercambio de objetos de forma simple y espontánea.
- Protocolos adoptados PPP: Proporcionan acceso al protocolo IP para garantizar interoperabilidad de los equipos Bluetooth con aplicaciones basadas en protocolos TCP y UDP.
- Comandos AT: Permiten configurar un equipo y enviarle instrucciones para ejecutar.

#### ***4.5.4 Modo de funcionamiento***

El estándar Bluetooth se basa en el modo de operación maestro/esclavo [13]. El término piconet se utiliza para hacer referencia a la red formada por un dispositivo y todos los dispositivos que se encuentran dentro de su rango. Pueden coexistir hasta 10 piconets dentro de un área de cobertura.

Como se muestra en la Figura 4.8, un dispositivo maestro se puede conectar simultáneamente con 7 dispositivos esclavos activos (255 cuando se encuentran en modo en espera). Los dispositivos en una piconet poseen una dirección lógica de 3 bits, para un máximo de 8 dispositivos. Los aparatos que se encuentran en el modo en espera se sincronizan, pero no tienen su propia dirección física en la piconet.

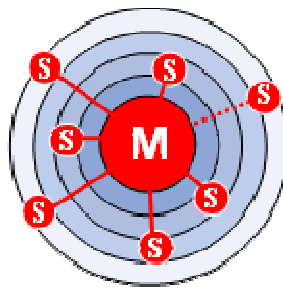


Figura 4.8: Relación maestro/esclavo

En realidad el dispositivo maestro sólo puede conectarse con un único esclavo al mismo tiempo. Por lo tanto, rápidamente va cambiando de un esclavo a otro para que parezca que se está conectando simultáneamente con todos los dispositivos esclavos.

Bluetooth permite que dos piconets puedan conectarse entre sí para formar una red más amplia, denominada "scatternet", al utilizar ciertos dispositivos que actúan como puente entre las dos piconets.

El establecimiento de una conexión entre dos dispositivos Bluetooth sigue un procedimiento relativamente complejo para garantizar un cierto grado de seguridad.

Durante el uso normal, un dispositivo funciona en modo pasivo, es decir, se encuentra escuchando la red. El establecimiento de una conexión comienza con una fase denominada solicitud. Durante este período el dispositivo maestro envía una solicitud a todos los dispositivos que encuentra dentro de su rango, denominados puntos de acceso.

Todos los aparatos que reciben la solicitud responden con su dirección. El dispositivo maestro elige una dirección y se sincroniza con el punto de acceso mediante una técnica denominada paginación, que principalmente consiste en la sincronización de su reloj y frecuencia con el punto de acceso.

De esta manera se establece un enlace con el punto de acceso que le permite al dispositivo maestro ingresar a una fase de descubrimiento del servicio del punto de acceso, mediante un protocolo denominado SDP (Service Discovery Protocol).

Cuando esta fase de descubrimiento del servicio finaliza, el dispositivo maestro está preparado para crear un canal de comunicación con el punto de acceso, mediante el protocolo L2CAP.

El punto de acceso puede incluir un mecanismo de seguridad denominado emparejamiento, que restringe el acceso sólo a los usuarios autorizados para brindarle a la piconet un cierto grado de protección.

El emparejamiento se realiza con una clave cifrada comúnmente conocida como PIN. Para esto, el punto de acceso le envía una solicitud de emparejamiento al dispositivo maestro. La mayoría de las veces se le solicitará al usuario que ingrese el PIN del punto de acceso. Si el PIN recibido es correcto, se lleva a cabo la conexión.

En el modo seguro, el PIN se enviará cifrado con una segunda clave para evitar poner en riesgo la señal. Cuando el emparejamiento se activa, el dispositivo maestro puede utilizar libremente el canal de comunicación establecido.

## 4.6 ZigBee

ZigBee es el nombre de la especificación de un conjunto de protocolos de alto nivel de comunicación inalámbrica para su utilización con radios digitales de bajo consumo, basada en el estándar IEEE 802.15.4 de redes inalámbricas de área personal.

Su objetivo son las aplicaciones que requieren comunicaciones seguras con baja tasa de envío de datos y maximización de la vida útil de sus baterías. Además, todo esto se logra tratando que el diseño de los chips sea lo más simple posible, reduciendo los costes.



Figura 4.9: Logo de ZigBee

El IEEE 802.15.4 es un estándar que define el nivel físico y el control de acceso al medio. Las capas que se encuentran por encima de la MAC no están definidas en este estándar y es por esta razón por la cual nació ZigBee Alliance.

### 4.6.1 ZigBee Alliance

ZigBee Alliance es un conjunto de más de 200 empresas asociadas, muchas de ellas fabricantes de semiconductores, que se encargan del desarrollo de esta tecnología inalámbrica. Algunas empresas importantes son Philips, Siemens, Samsung, Honeywell, Mitsubishi o Huawei [14].

Esta asociación de empresas es sin ánimo de lucro y tiene como misión el desarrollo de la tecnología inalámbrica ZigBee. Su lema es “Control inalámbrico que simplemente funciona” algo que resume perfectamente la esencia de ZigBee.

Su misión consiste en el desarrollo de ZigBee, y fundamentalmente lograr que los equipos de los diferentes fabricantes sean compatibles entre sí. Además, para poder tener esta interoperabilidad, todos los socios deben pactar las capas de nivel de red, seguridad y aplicaciones.

## **4.6.2 Prestaciones**

### **4.6.2.1 Frecuencia de trabajo**

ZigBee opera en la banda libre de 2.4GHz, pero también en las bandas ISM de 915 MHz y 868 MHz. En la banda de 2.4 GHz se proporcionan 16 canales de comunicaciones, con 3 MHz de ancho de banda cada uno.

### **4.6.2.2 Ancho de banda**

El caudal ofrecido es de 250 Kbps por canal en la banda de 2.4 GHz, de 40 Kbps en la banda de 915 MHz, y de 20 Kbps en la banda de 868 MHz.

### **4.6.2.3 Consumo de energía**

En transmisión ZigBee se requieren aproximadamente unos 120 mW y en reposo gracias a un excelente diseño solo necesita potencias tan pequeñas como 10  $\mu$ W.

### **4.6.2.4 Alcance y potencia de transmisión**

El alcance depende en gran medida del entorno en el que se produzcan las comunicaciones como sucede con todas las tecnologías de este tipo. Es de hasta unos 30 metros en recintos cerrados y de hasta 100 metros en espacios abiertos. Por lo general la potencia de la señal transmitida puede alcanzar los 2 mW (3 dBm).

## **4.6.3 Coste**

Está previsto que cuando el ritmo de fabricación alcance su punto álgido, el coste de producir un chip de ZigBee sea de sólo 1 euro.

## **4.6.4 Arquitectura de protocolos**

En la Figura 4.10 observamos que las primeras dos capas de la torre OSI, la física y la MAC, son definidas por el estándar IEEE 802.15.4. Las capas superiores son definidas por Zigbee Alliance. La pila de protocolos de Zigbee ocupa tan sólo 32KB o incluso sólo 4 KB para los entornos más limitados y menos exigentes. Con esto se logran abaratar costes en cuanto a la cantidad de memoria y al número de transistores que se necesitan.



Figura 4.10: Torre de protocolos ZigBee

Las distintas capas que componen la torre son:

- **Capa Física (PHY):** Compuesta a su vez de otras dos subcapas (una operando en la banda ISM y la otra en la banda libre de 2.4 GHz), viene definida por el estándar IEEE 802.15.4.
- **Capa de Control de Acceso al Medio (MAC):** Está descrita en el estándar IEEE 802.15.4 y tiene como misión la de controlar el acceso al enlace radio mediante el uso de CSMA/CA. Provee la funcionalidad suficiente como para transmitir tramas de baliza, sincronización de la red y transmisión segura mediante CRC y retransmisiones. Todos los dispositivos tienen direcciones IEEE de 64 bits para direccionamiento.
- **Capa de Red (NWK):** Definida por la Zigbee Alliance, envía y recibe datos de la capa de aplicación. Además realiza las funciones de agregarse y desagregarse de una red, aplicar seguridad y en los dispositivos coordinadores de lanzar redes y asignar direcciones cortas (de 2 bytes).
- **Capa de Aplicación:** Capa de nivel superior, definida también por la ZigBee Alliance.

#### ***4.6.5 Tipos de dispositivos***

Existen 3 tipos de dispositivos usados en redes Zigbee:

- **Coordinador (ZC):** Es el dispositivo más capaz de todos, la raíz del árbol de la red y puede servir de puente (o Bridge) entre varias subredes. Debe existir uno y sólo hay un coordinador por cada subred (muy parecido al rol del master en piconets Bluetooth). Se encarga de almacenar información sobre los dispositivos de la red así como de servir de fuente de las claves de seguridad. Se les considera FFD.



- Router (ZR) o Full Function Device (FFD): Hace de puente entre varios dispositivos, permitiendo encaminar las tramas hacía el nodo adecuado. Rol muy parecido al de los routers IP.
- Dispositivo final (ED) o Reduced Function Device (RFD): Tiene la funcionalidad limitada a hablar con su nodo padre (ya sea un router o el coordinador).

#### 4.6.6 Topología de redes

En la Figura 4.11 se muestran las diferentes topologías de red disponibles en ZigBee [15]:

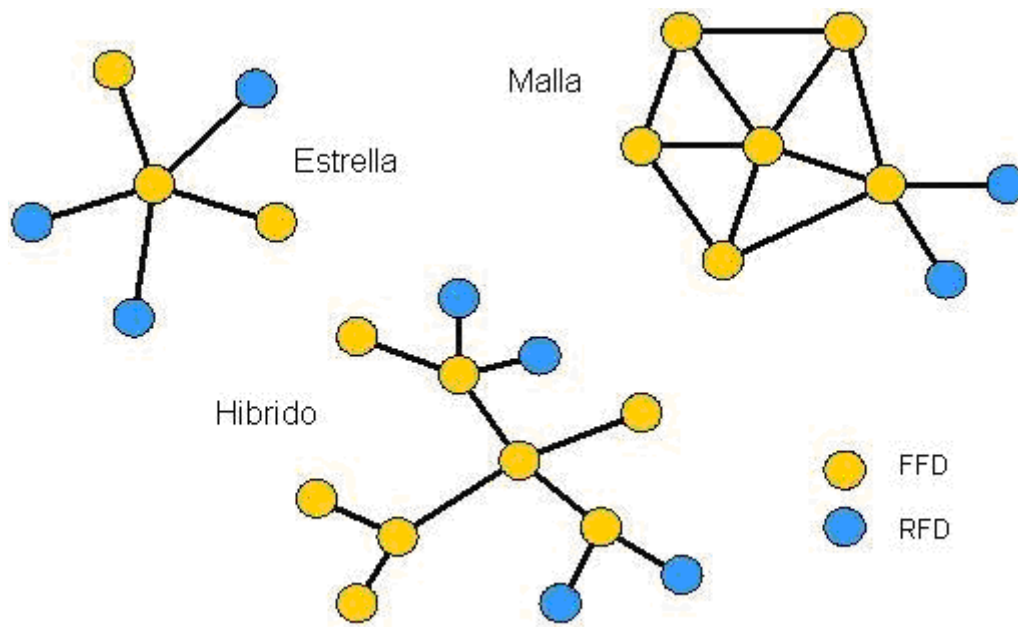


Figura 4.11: Posibles topologías en ZigBee

En todos los casos se trata de redes ad-hoc de dispositivos, pudiendo ser éstas malladas, en estrella o híbridas (en árbol o peer-to-peer).

Las redes pueden clasificarse según la forma de enviar datos entre los dispositivos, existiendo tres maneras diferentes de enviar los datos:

- Envío periódico

Es el nivel de aplicación del dispositivo el que decide cuando se inicia la transmisión de datos, por lo tanto no depende de las condiciones de la red. Básicamente cada cierto tiempo el sensor se activa, comprueba los datos, los envía a la red y se desactiva.

- Envío intermitente

Aquí tanto la aplicación como cualquier otro evento que suceda de forma repentina (como la activación de una alarma) deciden cuando el dispositivo debe enviar información. La diferencia con el caso anterior es que este envío no se hace cada cierto tiempo, sino sólo cuando se cree necesario hacerlo. Es el método más eficiente de todos.

- Envío repetitivo

El ratio de envío se fija a priori, es decir se utiliza el sistema GTS (Guaranteed Time Slot), que consiste en enviar información durante un cierto intervalo de tiempo prefijado cada cierto tiempo. En este caso no se puede decir que sea el sensor el que decida cuando enviar información, sino que será la propia red la que regule cuándo y cómo se debe hacer este envío.

Este método tiene similitudes con Aloha Ranurado puesto que ambos sistemas dividen el tiempo para la emisión de tramas en intervalos de duración constante. Además, los nodos deben sincronizarse para saber cuándo empieza cada intervalo.

## 4.7 Comparación de prestaciones

Ya se han analizado Wi-Fi, Bluetooth y ZigBee pero antes de realizar la comparativa es importante darse cuenta de nuestras necesidades.

Hay que hacerse la siguiente pregunta: ¿Qué exigencias tenemos que cubrir? No siempre la tecnología de mayores prestaciones es la que mejor se ajusta a lo que buscamos. Esto es algo mucho más complejo y hay que ver en primer lugar que requisitos deben cubrirse.

El cometido para el que va a utilizarse el enlace inalámbrico en las gafas de subtítulo será el de transmitir los subtítulos en formato texto y alguna información extra tipo comandos, pero en definitiva no será una cantidad ingente de datos. Además, hay que conseguir que el sistema completo de las gafas sea lo más compacto y ligero posible, por tanto el chip del receptor, la antena así como la batería deben ser de reducidas dimensiones.

Otro requisito importante es que con una pequeña batería el dispositivo debe tener una autonomía aceptable, como por ejemplo de al menos unas 4 horas de uso, para tener un cierto margen y evitar que el usuario se quede sin batería y, por lo tanto, sin subtítulos en mitad del visionado de una película.

A todo esto hay que añadir que en el cine la distancia máxima de empleo podría alcanzar los 30 metros con relativa facilidad.

Por último habría que usar una tecnología muy extendida y probada para minimizar posibles riesgos en cuanto a falta de soporte u otra serie de problemas similares.

Una vez tenemos claro que necesidades tenemos que cubrir a continuación pasamos a comparar las tres tecnologías en cada uno de esos puntos.

Reuniendo todas las características más importantes de cada tecnología tenemos la Tabla 4.4:

Estándar	Ancho de Banda	Consumo de energía	Alcance	Nodos en subred	Potencia de transmisión	Ventajas
Wi-Fi	Hasta 54 Mbps	0.6 W transmitiendo 30 mW en reposo	Superior a 90 metros	Máscara IP de subred	+20 dBm	Gran ancho de banda y alcance
Bluetooth	Hasta 1 Mbps	130 mW transmitiendo 0.6 mW en reposo	Hasta 30-40 en espacios cerrados	Máximo 8 nodos	4 dBm (Clase 2)	Interoperatividad
ZigBee	Hasta 250 kbps	120 mW transmitiendo 10 $\mu$ W en reposo	Hasta 30 metros en espacios cerrados	Máximo 255 nodos	3 dBm	Gran autonomía y sencillez

Tabla 4.4: Prestaciones más relevantes de Wi-Fi, Bluetooth y ZigBee

Bluetooth y Wi-Fi son dos tecnologías inalámbricas muy probadas y que han demostrado sobradamente que funcionan. ZigBee es una tecnología más tardía que Wi-Fi o Bluetooth.

Es por esta razón por lo que aún no está tan extendida como las otras dos alternativas, pero el que haya muchos grandes fabricantes detrás de ZigBee da garantías de que tendrá soporte y sufrirá mejoras en los próximos años. Por lo tanto, en este aspecto puede considerarse que las tres tecnologías están a la par.

#### 4.7.1 Tasas de transmisión

En lo referente a las velocidades de transmisión, el sistema ZigBee es el que menor tasa de bits por segundo proporciona siendo superado tanto por Bluetooth como por Wi-Fi. Aun así, para el tipo de aplicación tipo texto para el que va a usarse el enlace inalámbrico la velocidad de ZigBee sería suficiente en principio.

#### 4.7.2 Consumo

En el apartado energético tanto Bluetooth como ZigBee poseen un bajo consumo, no así Wi-Fi, cuyas necesidades de corriente eléctrica en funcionamiento

pueden resultar prohibitivas sobre todo considerando que la pequeña batería de que dispondrán nuestras gafas no va a ser de gran capacidad.

Las baterías que está previsto que se utilicen son de 3.7 V y 1000mAh. Wi-Fi en el peor caso que es el de transmisión consumiría unos 0.6 Wh y en el escenario más realista funcionando únicamente en modo recepción serían 0.48 Wh. Por lo tanto en 4 horas estaríamos hablando de aproximadamente 1.9 Wh. Si la capacidad máxima es de 3.7Wh nos quedan 1.8 Wh, un margen muy pequeño para alimentar el resto de chips de las gafas como son el procesador, la tarjeta de video e incluso el mismo sistema de presentación óptico.

Es por ello que el objetivo de lograr una autonomía de unas 4 horas sería difícilmente alcanzable con Wi-Fi. Aquí ZigBee gozaría de una ligera ventaja sobre Bluetooth debido a que su consumo en reposo es extremadamente reducido, del orden de microamperios, prolongando en gran medida la duración de la batería.

Esto es algo lógico teniendo en cuenta que una de las premisas fundamentales cuando se diseñó ZigBee era precisamente eso, tener un consumo extremadamente bajo en períodos de inactividad.

#### ***4.7.3 Alcance***

El alcance con Wi-Fi es más que suficiente y no habría ningún problema para llegar a cualquier punto de una sala de cine. En cambio con Bluetooth o ZigBee estaría algo más justo con un límite máximo muy cercano a los deseados 30 metros en interiores.

Si por las características de la sala no se lograra llegar a los lugares más alejados una solución con ZigBee sería introducir nodos en mitad de la sala. Por ejemplo situándolos en el techo, con lo que se reduciría la distancia máxima a recorrer y por tanto no existiría ya ese problema.

#### ***4.7.4 Coste***

Ninguno de los chips tiene un precio superior a los 4 euros lo que hace que todos sean asequibles económicamente. El más barato es el chip ZigBee debido a la simplicidad del diseño.

### ***4.8 Conclusiones y elección de la tecnología inalámbrica***

A continuación se resume todo lo anterior en la Tabla 4.5 donde están los requisitos y si están cubiertos por cada tecnología:

Estándar	Tasa de transmisión	Alcance de 30 m	Autonomía de 4 horas	Redes amplias	Coste	Soporte
	✓	✓	✗	✓	✓	✓
	✓	✓	✓	✗	✓	✓
	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Tabla 4.5: Relaciones entre requisitos y tecnologías

En definitiva, ZigBee y Bluetooth podrían ser capaces de realizar la tarea salvo por el limitado número de nodos de Bluetooth. Wi-Fi a pesar de cubrir perfectamente puntos como son el alcance o la tasa de transmisión no sería viable debido a su alto consumo eléctrico que impediría lograr una autonomía suficiente.

Si tuviésemos que elegir entre ZigBee o Bluetooth la balanza se inclinaría ligeramente a favor de la primera tecnología. Esto es así porque un punto muy interesante donde ZigBee difiere de Bluetooth es en el número máximo de nodos en cada subred (piconet). ZigBee permite hasta 255 nodos mientras que Bluetooth únicamente soporta 8. ZigBee también se adapta mejor a nuestras necesidades, especialmente en lo referente a que no necesitamos una velocidad de transmisión muy alta y tiene unas demandas de corriente muy bajas.

Además, si bien Bluetooth sigue mejorándose con nuevas versiones constantemente, ZigBee ha sido desarrollado varios años más tarde y es un concepto más moderno y que permanecerá en el mercado durante mucho tiempo.

Por todo lo comentado la tecnología elegida para dotar al prototipo de capacidad de comunicación inalámbrica es ZigBee. El siguiente paso es buscar el mejor kit de ZigBee para nuestro proyecto.



# CAPÍTULO

## 5

---

### *Elección del Kit de desarrollo ZigBee*

*5.1 Criterios de evaluación*

*5.2 PICDEM Z Demonstration Kit*

*5.3 Silicon Labs 802.15.4-2.4-DK*

*5.4 OKI ZigBee Developers Kit*

*5.5 CC2430DK Developmetn Kit*

*5.6 ZIGBIT Kit*

*5.7 RCM4510W Development Kit*

*5.8 Comparación de prestaciones*

*5.9 Conclusiones y elección del Kit*





## 5. ELECCIÓN DEL KIT DE DESARROLLO ZIGBEE

En este punto ya se ha optado por la tecnología ZigBee para el prototipo de gafas. Una vez hecha esta elección el siguiente paso es escoger un kit de desarrollo de tecnología ZigBee. Éste debe ser el más adecuado con vistas a que uno de sus módulos sea usado para dotar de capacidad inalámbrica a las gafas de subtítulo cerrado.

Hay un gran número de empresas que ofrecen plataformas de desarrollo ZigBee. Se realizó una intensa búsqueda a través de Internet para encontrar todos los kits que pudiesen resultar atractivos para este proyecto por alguna razón. De entre todas las plataformas existentes en el mercado se ha optado por evaluar las presentadas por los fabricantes Microchip, Silicon Labs, OKI, Texas Instruments, MeshNetics y Rabbit.

### *5.1 Criterios de evaluación*

Los criterios para tomar la decisión sobre que kit se adquirirá finalmente serán:

- Tipo de MCU integrada en los módulos.
- Interfaz de comunicación (existencia de puerto serie y número de pines I/O).
- Tamaño del módulo.
- Voltaje de alimentación.
- Precio.
- Software de desarrollo incluido en el kit.

El primer paso será proceder a un análisis de cada uno de los kits de desarrollo que han sido encontrados tras una búsqueda intensiva y que han dado la impresión de ser buenos candidatos por alguna razón. En este estudio de cada kit se expondrán sus principales características. Posteriormente reflexionaremos sobre las necesidades de nuestras gafas inalámbricas para saber qué estamos buscando exactamente.

Por último, se compararán todos los kits observando sus puntos fuertes y débiles optando finalmente por uno de los kits en función de los requisitos a cubrir.

### *5.2 PICDEM Z Demonstration Kit*

#### ***Contenido del kit***

Este kit de la empresa Microchip incluye:

- 2 placas PICDEM Z.

- 2 placas MRF24J40MA PICDEM Z 2.4 GHz RF.
- CD-ROM PICDEM Z.
- Un analizador de red ZENA.
- Cable USB.
- CD-ROM ZENA.



Figura 5.1: Contenido del kit de Microchip

Las placas MRF24J40MA que vienen en el kit son las encargadas de proporcionar la capacidad de comunicación ZigBee aunque no poseen una MCU integrada en ellas. Por lo tanto, para hacer funcionar estas placas y que transmitan y reciban información es necesario acoplarlas a otras placas más grandes, las placas PICDEM Z, las cuáles sí poseen una MCU.

Las placas PICDEM Z constan de un microcontrolador PIC18F4620 de arquitectura de 8 bit. Estas placas se conectan vía puerto serie a un PC para posteriormente programar sus MCU y crear prototipos con aplicaciones creadas por el usuario. Además se tiene acceso a pines I/O [16].

La MCU, si bien es programable por el usuario, viene ya preparada inicialmente con una pila de red ZigBee gratuita que implementa un nodo final ZigBee. Menos de 12 Kbytes de memoria flash y un par de cientos de bytes de RAM son usados para esta tarea por lo que el resto de recursos de la MCU pueden ser gestionados por el usuario para ejecutar sus propias aplicaciones [17].

Además, para acelerar el proceso de aprendizaje en uno de los CD-ROM incluidos en el kit se incluyen ejemplos de aplicaciones sencillas para comenzar rápidamente a usar las placas.

Es importante recordar que las pilas de protocolos ZigBee de Microchip son completamente gratuitas pudiendo descargarse las últimas versiones desde su página web. Para programar las MCU se usa el software MPLAB IDE.

El kit también consta de un dispositivo analizador de red ZENA que se conecta vía USB al PC y nos permite capturar los mensajes que se transmiten los nodos de la red ZigBee entre ellos.

### ***Características de la MCU***

Como ya se ha comentado antes, el modelo de MCU con el que están equipadas las placas de desarrollo es el PIC18F4620 de 8 bit que funciona a una frecuencia de 4 MHz. Posee 64 Kbytes de memoria Flash y 4Kbytes de memoria RAM.

### ***Precio***

El PICDEM Z Demonstration Kit cuesta 180€. Si existiesen necesidades de aumentar el número de placas, la placa PICDEM Z y la MRF24J40MA pueden adquirirse por separado a un precio de 70€ y 40€ respectivamente.

### ***Tamaño***

Las dimensiones de las placas de desarrollo PICDEM Z son aproximadamente de 104mm x 90.5mm. Por lo tanto, tienen un tamaño comparable al de un CD-ROM. Además, al unir las placas PICDEM Z con las placas que proporcionan la capacidad inalámbrica ZigBee el tamaño final es aún mayor.

### ***Alimentación***

La placa PICDEM Z únicamente puede ser alimentada con una tensión de 9V mediante dos opciones: un adaptador de tensión o una pila.

## ***5.3 Silicon Labs 802.15.4-2.4-DK***

### ***Contenido del kit***

El kit de la empresa Silicon Labs contiene:

- 2 placas de desarrollo con antenas.
- 1 fuente de alimentación de 9V y 1.5 A.
- 1 adaptador USB.
- 2 cables USB para conectar las placas al PC.
- 2 baterías de 9V.

- CD-ROM con software de evaluación de Silicon Labs que incluye un set completo de herramientas de desarrollo así como ejemplos sencillos de aplicaciones.



Figura 5.2: Contenido del kit de Silicon Labs

Las placas de desarrollo que vienen en el kit tienen integradas tanto la capacidad de comunicación ZigBee como la MCU. Por lo tanto, para hacer funcionar estas placas no es necesario acoplarlas a otras placas más grandes, como sucede con las placas PICDEM Z de Microchip, lo cual es una ventaja.

Los módulos del kit vienen precargados con una pila ZigBee y una aplicación sencilla a modo de ejemplo para ponerlos en marcha rápidamente aunque sus MCU siempre pueden ser reprogramadas vía USB a través del PC.

En la hoja de características de los módulos disponible en la web del fabricante no se menciona si tienen pines de I/O programables por el usuario sin embargo si aparece que el microcontrolador del tipo 8051 dispone de 48 pines I/O. Del mismo modo se hace referencia a la existencia de un puerto serie en esta MCU.

En el CD-ROM se incluye el software de evaluación necesario para programar los microcontroladores y también para que el usuario pueda crear sus propias aplicaciones todo ello usando la aplicación Silicon Labs IDE [18].

Al igual que el kit de Microchip en el CD-ROM también vienen incluidas aplicaciones sencillas para ayudar a que el usuario se familiarice en el manejo y programación de las placas.

### ***Características de la MCU***

La MCU que poseen las placas de desarrollo es el microprocesador C8051F121 de 8 bit que funciona a una frecuencia de 8 MHz. Posee 128 Kbytes de memoria Flash y 8 Kbytes de memoria RAM.

### ***Precio***

El precio del Silicon Labs 802.15.4-2.4-DK es de 300€ si se compra a través de la página web del fabricante.

### ***Tamaño***

No ha sido posible encontrar las dimensiones exactas de las placas de desarrollo. A pesar de esto, hay que decir que tienen unas dimensiones bastante reducidas a la vista del tamaño que presentan respecto a pilas de 9V (véase la Figura 2), siendo algo más grandes que éstas.

### ***Alimentación***

Las placas de desarrollo pueden alimentarse con una tensión de 9V mediante un adaptador de tensión, una pila de 9V o a través del cable USB (todos estos elementos vienen incluidos en el kit).

## ***5.4 OKI ZigBee Developers Kit***

### ***Contenido del kit***

OKI incluye en su kit de desarrollo lo siguiente:

- 1 placa OKI ZigBee de evaluación (zNED).
- 2 sticks USB que conectados a PCs proporcionan capacidad de comunicación 802.15.4.
- Un sensor analizador de red Diantree.
- Diverso software de evaluación como librerías de la pila ZigBee de OKI además de los programas IAR Embedded Workbench para desarrollar aplicaciones y Diantree para analizar la red.



Figura 5.3: Contenido del kit de OKI

Entre las características más destacables de la placa zNED hay que destacar que dispone de varias entradas para sensores u otro tipo de dispositivos que elija el usuario así como de opciones para salidas.

También posee un acelerómetro de 3 ejes, un sensor de temperatura, un fotosensor, 3 LEDs que el usuario puede configurar para que se enciendan en momentos determinados, una bocina y un display de 2 líneas de 16 caracteres cada una para mostrar información.

Como sucede con el kit de Silicon Labs, la MCU integrada en la placa se programa mediante una conexión USB a un PC. Además, la placa de desarrollo dispone de una toma para puerto serie que permite comunicar la MCU con otros dispositivos.

Una característica que no tiene ningún otro kit de la comparativa (aunque siempre puede ser adquirida por separado) es que se incluyen 2 sticks USB para dotar de capacidad ZigBee a PCs. Esto puede resultar extremadamente útil pues se puede tener un PC como servidor principal que coordine el resto de nodos de una forma muy rápida y sencilla.

Para que el usuario sea capaz de crear sus propias aplicaciones OKI ha incluido en el CD-ROM de software una licencia de evaluación del IAR debugger. También están incluidos pequeños programas a modo de ejemplo para hacerse en un corto período de tiempo con la programación de la placa.

### ***Características de la MCU***

El microcontrolador de la placa de OKI es el ML67Q4061 de 32 bit con 128 Kbytes de memoria Flash y 16 Kbytes de RAM [19].

### ***Precio***

El precio del kit de desarrollo de OKI es de 400€.

### ***Tamaño***

Las dimensiones de la placa de desarrollo son 85.72mm x 63.5mm.

### ***Alimentación***

La placa incluida en el kit puede alimentarse de diversas formas. Puede hacerse a través de 2 baterías de 1.5 V, desde el conector USB o directamente de una fuente de alimentación.

## ***5.5 CC2430DK Development Kit***

### ***Contenido del kit***

El kit de desarrollo consta de los siguientes elementos (Figura 5.4):

- 2 placas SmartRF04EB.
- 2 módulos de evaluación CC2430EM.
- 2 antenas.
- 2 cables USB.
- Compilador C IAR EW8051 con debugger C-SPY (licencia de evaluación).
- Software Z-Stack de Texas Instruments.



Figura 5.4: Contenido del kit de Texas Instruments

El kit de Texas Instruments se distingue del resto en que su placa de desarrollo integra simplemente dos chips: uno que da la capacidad ZigBee, y el otro es una MCU del tipo 8051. No incorpora sensores, tomas USB o conectores para puerto serie, ni tampoco botones o LEDs luminosos como otras placas, solamente dos sockets para acceder a los pines del chip CC2430 con lo que se logra un tamaño muy reducido.

El precio a pagar por ello es que para reprogramar la MCU siempre hay que conectar la placa de desarrollo a otra placa mucho más grande, la SmartRF04EB, la cual se conecta vía USB y puerto serie al PC.

El chip CC2430 dispone de 21 pines I/O así como dos potentes USART con soporte para varios protocolos serie [20].

Como sucede en el resto de kits Texas Instruments incluye ejemplos de aplicaciones sencillas para reducir el tiempo de adaptación del usuario. Además, este fabricante al igual que OKI ha optado por incluir en el software de desarrollo del kit una versión de evaluación del IAR Embedded Workbench. La placa SmartRF04EB usada en conjunto con este software permite la simulación de un sistema.

### ***Características de la MCU***

Como ya se ha comentado antes, el modelo de MCU con el que están equipadas las placas de desarrollo es el C8051 de 8 bit que funciona a una frecuencia de 4 MHz. Posee 128 Kbytes de memoria Flash y 8 Kbytes de memoria RAM.

### ***Precio***

El CC2430DK Development Kit cuesta 430€. Si se quisiera aumentar el número de placas CC2430EM se pueden adquirir en grupos de 2 unidades por 80€ (40€ cada una).

### ***Tamaño***



Figura 5.5: Módulo CC2430EM



En la Figura 5.5 tenemos una foto donde se puede apreciar perfectamente el reducido tamaño del módulo CC2430EM. Las dimensiones aproximadas son 43mm x 30mm.

### *Alimentación*

Las placas CC2430EM se alimentan con una tensión de 3.3V mientras que las placas programadoras SmartRF04EB admiten diversas formas de alimentación y diferentes voltajes como 3.3V y 9V.

## *5.6 ZIGBIT Kit*

### *Contenido del kit*

Como se observa en la Figura 5.6, el contenido del kit ZIGBIT del fabricante MeshNetics es el siguiente:

- 3 placas de desarrollo MeshBean que implementan diferentes tipos de antenas.
- 3 módulos ZIGBIT montados sobre placas MeshBean.
- 3 cables USB.
- 2 cables para interfaz externa.
- 1 CD con software y documentación. El programa de desarrollo incluido es BitCloud con una licencia de evaluación de 45 días si se opta por la versión Lite del kit.



Figura 5.6: Kit ZIGBIT

Las placas de desarrollo MeshBean poseen capacidad ZigBee y al mismo tiempo disponen de una MCU integrada y programable por el usuario. Estas placas al estar pensadas para crear prototipos, principalmente para aplicaciones de domótica, traen consigo 2 botones programables, 3 LEDs programables, 3 switches así como sensores de luz y de temperatura. Además de estos últimos sensores ya integrados, el usuario puede conectar a las placas otros sensores externos a su elección para ser utilizados.

Las placas MeshBean disponen de 20 pines I/O uno de los cuales es un pin para proporcionar una interfaz puerto serie [21].

En el CD-ROM se incluye BitCloud, un software de desarrollo en versión de evaluación creado por la propia empresa MeshNetics. Proporciona una pila y una forma de crear aplicaciones para las placas ZIGBIT.

### ***Características de la MCU***

El microcontrolador por el que la empresa MeshNetics ha optado para sus placas MeshBean es el ATmega1821V de 8 bit fabricado por la empresa Atmel. Trabaja a una frecuencia de 4 MHz y posee 128 Kbytes de memoria Flash y 8 Kbytes de RAM.

### ***Precio***

El kit de desarrollo de ZIGBIT cuesta 340€ a través de su página web.

### ***Tamaño***

Las dimensiones de las placas MeshBean son 66mm x 60 mm.

### ***Alimentación***

Las placas MeshBean pueden alimentarse con voltajes en el rango que va desde 1.8V a 3.6V mediante el conector USB, un adaptador de corriente continua o un par de pilas de 1.5V.

## ***5.7 RCM4510W Development Kit***

### ***Contenido del kit***

Este kit del fabricante Rabbit consta de:

- 1 placa de desarrollo RabbitCore para hacer prototipos (Figura 5.7).
- USB Digi XBee.
- CD-ROM con el software de desarrollo Dynamic.
- 1 adaptador de corriente.



Figura 5.7: Placa de desarrollo RCM4500W de Rabbit

El kit RCM4500W trae lo esencial para poder diseñar prototipos que tengan un microcontrolador y capacidad inalámbrica ZigBee.

Esta placa de desarrollo está específicamente diseñada para trabajar con módulos inalámbricos XBee. Hay que decir que Rabbit no incluye ningún módulo XBee en el kit, el cuál al ser el encargado de proporcionar la capacidad ZigBee es absolutamente imprescindible para poder elaborar prototipos con esta placa.

El CESyA, donde se ha desarrollado este proyecto, dispone de algunos módulos XBee adquiridos para otros proyectos y ha sido precisamente por esta razón por la que este kit ha sido incluido en la comparativa.

Esta placa tiene 40 pines I/O y otros 9 pines adicionales disponibles a través del modem ZigBee. Además, para la comunicación dispone de 6 puertos serie [22].

El software de desarrollo Dynamic que viene con el kit incluye un editor, un compilador y un debugger. Para la carga de los programas de ejemplo o los implementados por el usuario en esta placa puede realizarse a través de puerto serie o de USB.

### ***Características de la MCU***

El microprocesador que equipa esta placa es el Rabbit 4000 de 8 bit y que trabaja a una frecuencia de 29.49 MHz. Dispone de 512 Kbytes de memoria Flash y 512Kbytes de memoria RAM.

### ***Precio***

El RabbitCore Development Kit cuesta 250€. Cada placa adicional RCM4500W puede comprarse por 70€. Además, como ya se ha dicho tendrían que adquirirse los módulos XBee por separado. No sería nuestro caso debido a que el CESyA ya dispone de este tipo de módulos.

## ***Tamaño***

La placa de desarrollo tiene un tamaño de 47mm x 72 mm.

## ***Alimentación***

Cuando tiene un módulo XBee conectado la placa RCM4500W únicamente puede ser alimentada con una tensión de 3.3V.

## ***5.8 Comparación de prestaciones***

Debemos tener muy presente el tipo de sistema en el que van a ser empleados los módulos ZigBee, que no es otro que las gafas de subtítulo para cines.

En este tipo de dispositivo el tamaño del módulo es algo muy relevante, cuanto menor sea éste mucho mejor. Hay que lograr en la medida de lo posible que todo el sistema sea fácilmente transportable por el usuario, pese poco y no estorbe en exceso. Es por ello que hay que tener en cuenta las dimensiones de la placa de desarrollo.

Un segundo punto a considerar es el tipo de MCU que equipan las placas, si es que disponen de ella, siendo lo idóneo que además de encargarse de la recepción de datos, como los subtítulos u otra serie de comandos, puedan aprovecharse además para configurarse como deseemos y que ejecuten simultáneamente nuestra aplicación encargada de presentar en las gafas los subtítulos.

Para ello la MCU debe tener cierta potencia. Un diseño de placa compacto reduciría el tamaño del prototipo, su complejidad y presumiblemente el consumo al no tener que incluir una segunda MCU que se encargue de la presentación de los subtítulos.

Un detalle a tener muy en cuenta en las placas es si disponen de pines I/O configurables por el usuario para poder añadir LEDs o pulsadores si es que las placas no disponen de ellos así como también potenciómetros. Algo muy relevante es que dispongamos de al menos un puerto serie para poder conectar la tarjeta de video a la MCU de la placa. Sin este interfaz de comunicación nos sería imposible usar una única MCU en el prototipo.

Otro factor importante a tener en mente es el tipo de alimentación del módulo. Un objetivo muy deseable de lograr en el prototipo de las gafas es que todo el sistema esté alimentado por una única batería de litio recargable de 3.7V.

Debido a esto, en un principio las placas que se alimenten en exclusiva a través de tensiones de 9V no serían una buena opción. Otras soluciones que se alimenten con tensiones inferiores a 3.7V, como por ejemplo 3.3V, si podrían implementarse más fácilmente ya que podríamos obtener ese voltaje a través de un pequeño regulador de tensión que aunque aumentaría un poco el tamaño del prototipo sería considerado como un mal menor.

La mayoría de las placas traen diversos sensores de luz y temperatura así como botones y LEDs programables. Si bien el disponer de los botones y los LEDs podría resultar interesante, los sensores en un principio se verían como algo totalmente accesorio sin ningún tipo de relevancia para nuestro sistema.

Resumiendo todo lo anterior, buscamos una placa de desarrollo ZigBee lo más pequeña posible, que tenga pines I/O, posea al menos un interfaz de comunicación serie, disponga de una MCU potente y programable por nosotros a la vez que todo el conjunto pueda ser alimentado por una tensión igual o inferior a 3.7V.

Tras ver cuáles son nuestras necesidades procedemos a la comparativa de los kits de desarrollo ZigBee. Agrupando todas las características más destacables de cada kit tenemos la Tabla 5.1:

Tipo de Kit	Tamaño de la placa	Tipo de MCU	Tensión	Placas incluidas	Interfaz de la placa	Precio
Microchip PICDEM Z	104mm x 90.5mm	PIC18F4620 8 bit 4 MHz 64 KB Flash y 4KB RAM	9V	<ul style="list-style-type: none"> <li>2 PICDEMZ</li> <li>2 placas ZigBee</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>pines I/O</li> <li>1 puerto serie</li> </ul>	180€
Silicon Labs DK	Superior al de una pila de 9V	C8051F121 8 bit 8 MHz 128 KB Flash 8 KB RAM	3.3V-9V	<ul style="list-style-type: none"> <li>2 placas de desarrollo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>pines I/O</li> <li>1 puerto serie</li> </ul>	300€
OKI ZDK	85.7mm x 63.5mm	ML67Q4061 32 bit 128 KB Flash 16 KB RAM	3.3V, 9V	<ul style="list-style-type: none"> <li>1 placa zNED</li> <li>2 sticks para PC ZigBee</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>16 pines I/O</li> <li>1 puerto serie</li> </ul>	400€
CC2430DK	43mm x 30mm	C8051 8 bit 4 MHz 128 KB Flash 8 KB RAM	3.3V	<ul style="list-style-type: none"> <li>2 placas CC2430EM</li> <li>2 placas SmartRF04</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>21 pines I/O</li> <li>2 USART comunicación serie</li> </ul>	430€
ZIGBIT	66mm x 60mm	ATmega1281 8 bit 4 MHz 128 KB Flash 8 KB RAM	1.8V-3.6V	<ul style="list-style-type: none"> <li>3 placas MeshBean</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>20 pines I/O</li> <li>1 puerto serie</li> </ul>	340€
RCM4510W	72mm x 47mm	Rabbit 4000 8 bit 29.5MHz 512KB Flash 512KB RAM	3.3V	<ul style="list-style-type: none"> <li>1 placa RabbitCore</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>40+9 pines I/O</li> <li>6 puertos serie</li> </ul>	250€

Tabla 5.1: Prestaciones más relevantes de cada kit de desarrollo

### 5.8.1 Dimensiones de la placa

En este apartado destaca el reducidísimo tamaño de la placa de evaluación del kit de Texas Instruments equipado con el chip CC2430. Es la placa más pequeña de

todas. Esto se debe a que en la placa simplemente están el chip encargado de proporcionar la capacidad ZigBee, la antena, la MCU y el cristal de frecuencia.

En segundo lugar en cuanto a menor tamaño, pero a mucha más distancia, estaría la placa de desarrollo del fabricante Silicon Labs. Esta cuenta con unas dimensiones que estarían muy cerca del límite para poder construir el prototipo.

A la cola en cuanto a tener unas reducidas dimensiones tenemos la placa de Microchip, demasiado grande a todas luces para nuestro propósito.

### ***5.8.2 Tipo de MCU e Interfaz***

Como se ha podido comprobar hay una amplia variedad de MCUs en los kits. La MCU más potente de todas es con diferencia la que equipa a la placa del kit RCM4510W. El Rabbit 4000 es el microcontrolador con mayores prestaciones y cantidad de memoria de los kits sometidos a comparación con quizás demasiada capacidad para nuestras pretensiones.

En el extremo opuesto tenemos a la placa de desarrollo de Microchip dotada de un microcontrolador PIC que dispone de sólo 64 KB de memoria Flash y RAM, algo que a priori parece muy escaso para nuestras pretensiones de emplearlo como la única MCU que dirija todo del sistema final. Además, en este caso la MCU no está integrada en la misma placa que tiene capacidad ZigBee lo cuál es otro punto negativo a resaltar.

Entre medias de estas dos opciones están las placas de Texas Instruments y Silicon Labs que traen incluido un microcontrolador 8051, el cual ya fue empleado en el antiguo prototipo de gafas y que demostró ser capaz de poder cumplir con la tarea. MCUs de prestaciones similares al 8051 serían las soluciones propuestas por OKI y Meshmetics.

En cuanto a la interfaz de las placas, todas ellas disponen de pines I/O y al menos un puerto de comunicación serie, aunque en el caso de la placa de Silicon Labs no se ha podido averiguar si ese puerto está disponible para el usuario.

### ***5.8.3 Alimentación***

Como ya se ha comentado antes, uno de los objetivos deseables es que podamos alimentar el sistema de las gafas con una única batería de 3.7V. La mayoría de las placas serían capaces de lograr esto si empleásemos un pequeño regulador que rebaje la tensión de 3.7V a 3.3V. El único kit que no admite este tipo de alimentación es el de Microchip, el cuál necesita 9V de alimentación.

En las placas de uno de los kits, el de Silicon Labs, ya vienen unos reguladores de tensión incorporados, por lo que podría alimentarse directamente con la batería de 3.7V.

#### 5.8.4 Coste

Hay todo un abanico de precios entre los kits comparados. El conjunto que posee un precio más ajustado es el de la empresa Microchip aunque tampoco hay que olvidar que esto se debe principalmente a que también es el que ofrece las menores prestaciones.

El kit que quizás tenga la mejor relación precio-número de placas-prestaciones del hardware si no tenemos en cuenta la solución de Microchip es el de la empresa MeshNetics con su ZIGBIT.

Uno de los motivos de incluir el kit de Rabbit en la comparativa es que el CESyA ya dispone de módulos XBee adquiridos para otros proyectos, por lo que podrían reaprovecharse con esta placa, reduciéndose así los costes. Sin embargo, a la vista del precio final del kit el ahorro con respecto a las otras soluciones del mercado no sería significativo.

#### 5.9 Conclusiones y elección del kit

A continuación se resume todo lo anterior en la Tabla 5.2 donde están los requisitos de las gafas de visionado para cines y si están cubiertos por cada placa de desarrollo que viene en los kit:























Necesidades/ Tipo de kit	Pequeño tamaño de la placa	MCU programable y potente	Interfaz serie y pines I/O	Alimentación inferior o igual a 3.7V
Microchip PICDEM Z				
Silicon Labs DK	-			
OKI ZDK				
CC2430DK				
ZIGBIT	-			
RCM4510W				

Tabla 5.2: Relaciones entre requisitos y los distintos kits de desarrollo

El kit de Microchip es el candidato ideal para hacer pequeñas pruebas con tecnología ZigBee, construir prototipos muy sencillos que no exijan mucho a la MCU y

donde el tamaño no sea algo importante. Desafortunadamente este no es nuestro caso, pues necesitamos una placa lo más pequeña posible.

Los kits que cubrirían en principio todos los criterios que han sido planteados serían el kit de Silicon Labs, el Texas Instruments CC2430DK y el ZIGBIT de MeshNetics si bien el tamaño de las placas de Silicon Labs y de ZIGBIT estaría muy cerca del límite de lo deseable.

Un punto favorable al kit de Silicon Labs es que el software de desarrollo, el Silicon Labs IDE, ya ha sido usado por el CESyA para otros proyectos.

Si hubiese que optar por uno de ellos la decisión debería hacerse entre el kit de Silicon Labs y el de Texas Instruments. El CC2430DK es el más caro de todos, pero también es cierto que es el que mejor cubre todos los requisitos que se están buscando: su placa es la más pequeña, dispone de una MCU lo suficientemente potente y puede ser alimentado con la batería de 3.7V. El único punto negativo de este kit además de su precio es que sería necesaria la adquisición de una licencia para su software de desarrollo, pues la licencia de evaluación dura 60 días. Esto no sucedería con el kit de Silicon Labs.

Tras todo lo comentado, la elección recae sobre el kit de Texas Instruments CC2430DK y sobre él se trabajará para construir el enlace inalámbrico de las gafas.



# CAPÍTULO

## 6

---

### *Elección de la tarjeta de vídeo*

#### *6.1 DECADENET BOB-4*



## 6. ELECCIÓN DE LA TARJETA DE VIDEO

La tarjeta de vídeo es una parte muy importante del dispositivo receptor ya que es la encargada de generar una señal de vídeo compuesto (NTSC/PAL) con los subtítulos de la película. Esta señal será construida a partir de la información contenida en los paquetes de información enviados por el servidor y se mostrará a través de las gafas que queramos conectar al prototipo.

Las características más importantes que hay que tener en cuenta en cuanto la tarjeta de vídeo son:

- Resolución.
- Consumo.
- Interfaz puerto serie.
- Tamaño de letra/número de caracteres por línea.
- Color (si dispone de esa opción).
- Precio contenido.

Los subtítulos de las gafas serán creados mediante un On-Screen Display (OSD). Un OSD consiste en una imagen superpuesta a otra señal de video para mostrar información como volumen, canales, hora o subtítulos. Su uso está muy extendido en pantallas de televisión, grabadores de video y reproductores DVD.

En el momento de la realización del estudio de módulos de video, tras buscar intensamente por la red OSDs de bajo coste, se llegó a la conclusión de que ninguno de los encontrados cumplía al cien por cien con las características deseadas.

A pesar de ello se procedió a analizar algunas de ellos. Una comparativa puede verse en la Tabla 6.1.

Tipo de OSD	Tamaño de la placa	Resolución	Tensión	Velocidad puerto serie	Color	Definir símbolos	Precio
OSD-232	63.5mm x 63.5mm	28 columnas y 11 filas	8-14V	2400 o 4800 baudios	Sí	No	99\$
HC OSD	96.5 mm x 63.5mm	256x192 pixels	6V-9V	19200 baudios	No	No	129.99\$
BOB4	85.7mm x 63.5mm	320x240 (NTSC) 384x288 (PAL)	5V	1200 – 153600 baudios	No	Sí	99\$
MAX7456	-	30 columnas y 16 filas	5V	4800 - 19200 baudios	No	Sí	9\$ chip 99\$ kit

Tabla 6.1: Comparativa de OSDs analizados

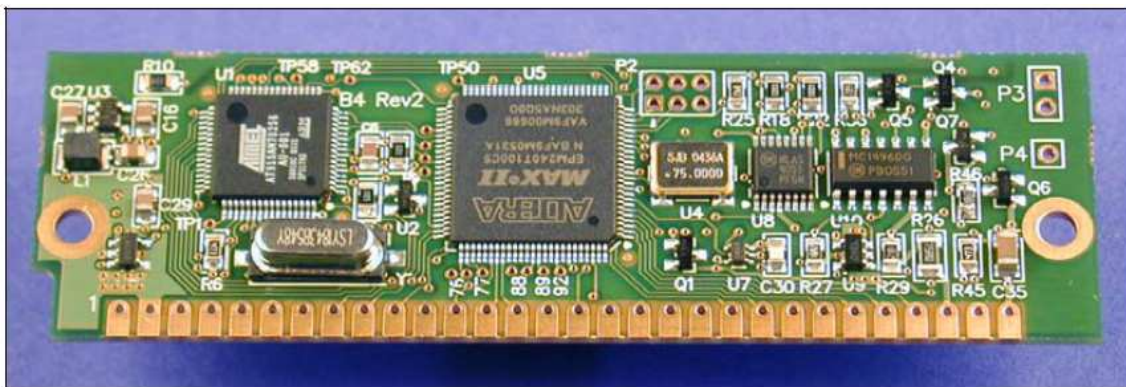
Algunas tarjetas de video analizadas fueron el modelo MAX7456 fabricado por MAXIM que satisfacía muchas de las exigencias pues poseía una buena resolución y un suficiente número de caracteres por línea así como capacidad para definir nuevos caracteres pero que carecía de generar letras en color. Lo mismo sucedió con la tarjeta BOB-4.

Sin embargo, tras contactar directamente con la empresa DECADENET, fabricante de los módulos de video BOB-4, ésta confirmó la existencia del desarrollo de un nuevo módulo, la futura tarjeta BOB-6, que cumplirá con todos los puntos que se buscan. Desafortunadamente, como muy pronto no estará disponible comercialmente hasta finales de 2009.

Dejando como posible mejora futura la integración de la tarjeta BOB-6 con el resto de componentes, se ha optado por usar el modelo anterior del mismo fabricante, la tarjeta BOB-4, que será compatible parcialmente con el nuevo modelo en lo que se refiere a aspectos como los comandos de control y presentación de imágenes.

## 6.1 DECADENET BOB-4

Existen 2 tipos de modelos de BOB-4 que se diferencian en el tipo de conexionado, son la BOB-4H y la BOB-4S. Para el prototipo se escogió la BOB-4S que aparece en la Figura 6.1 porque se consideró que la disposición de los pines era la más adecuada para obtener un tamaño final más reducido.



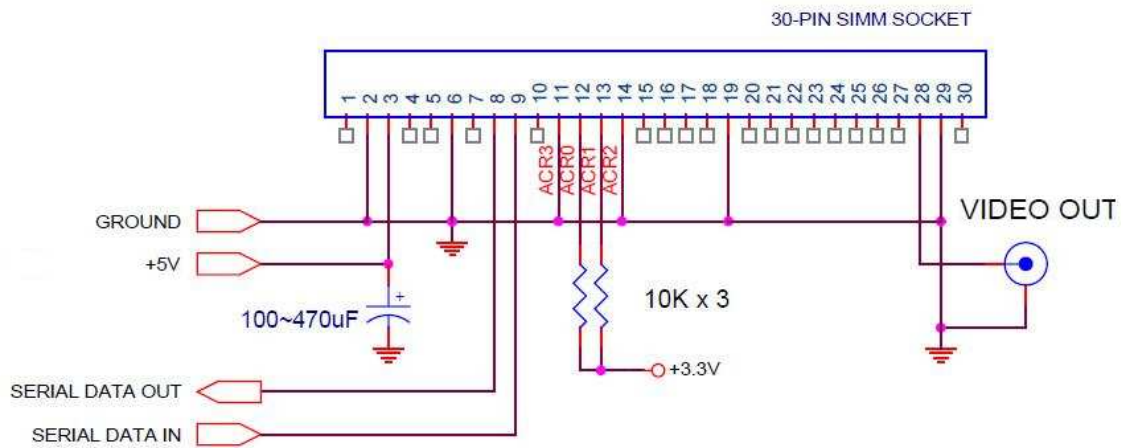


Figura 6.2: Configuración de la BOB-4S para trabajar a 38400 bps

Para configurar la BOB-4S a esa velocidad sus pines deben estar como los de la Figura 6.2. Este conexionado de pines será usado cuando se implemente el prototipo final en un circuito de cobre.



# CAPÍTULO

## 7

---

### *Head-Mounted Display*

#### *7.1 SCALAR TELEGLASS T3-F*





## 7. HEAD-MOUNTED DISPLAY

Un Head-Mounted Display o HMD es un dispositivo de visualización que permite reproducir imágenes creadas por ordenador sobre un display muy cercano a los ojos o directamente sobre la retina. Un HMD típico puede tener uno o dos pequeños displays con lentes y espejos semitransparentes integrados en gafas o en visores. Los displays pueden ser del tipo CRT, LCD o los nuevos OLED.

Entre las principales aplicaciones de los HMD se incluyen las militares, gubernamentales (bomberos, policía, etc.), civil y comercial (medicina, videojuegos, etc.). Sobre todo su uso se está extendiendo cada vez más en los cockpits de los helicópteros y aviones de combate modernos como los de la Figura 7.1.



Figura 7.1: HMD usado por los pilotos de combate

Estos suelen estar completamente integrados con el casco de vuelo del piloto y puede incluir viseras de protección, dispositivos de visión nocturna y al mismo tiempo mostrar datos de otros sistemas. El coste de estos dispositivos tan novedosos es sin embargo extremadamente alto por lo que actualmente están completamente fuera del alcance de casi la totalidad de la población.

Debido a su proximidad con los ojos, el HMD consigue que las imágenes visualizadas resulten mucho mayores que las percibidas por pantallas normales permitiendo incluso englobar todo el campo de visión del usuario.

Los HMDs pueden presentar únicamente imágenes generadas por ordenador (CGIs), mostrar imágenes del mundo real o una combinación de ambas cosas.

Algunos HMDs logran cubrir un campo tan grande de visión del usuario que éste no tiene influencias visibles del entorno que le rodea, logrando así la completa inmersión en una realidad virtual, ya que sólo se perciben las imágenes recibidas en video y que son reproducidas sobre el display.

Sin embargo, para nuestra aplicación esto es contraproducente puesto que deseamos visionar la película que se proyecta en la pantalla de cine al mismo tiempo que leemos los subtítulos. Lo que buscamos en la medida de lo posible son los Head-Mounted Displays que sí permiten al usuario ver el entorno que le rodea al mismo tiempo que se le muestran CGIs.

Normalmente en la forma de reproducir este sistema se utilizan dos tecnologías:

- Pantalla de mezcla de imágenes (Video See-Through Display).
- Pantalla óptica transparente (Optical See-Through Display).

El primer sistema integra CGIs con imágenes reales captadas por una cámara y a continuación presenta una imagen compuesta a los ojos del usuario a través de un display.

En el caso de la pantalla óptica transparente no se requiere llevar ningún tipo de equipo, ya que el rastreo de la imagen del mundo real no es necesario debido a que son propios los ojos del usuario los que captan directamente esto.

## *7.1 SCALAR TELEGLASS T3-F*

El visor elegido para el prototipo es el Teleglass T3-F del fabricante japonés SCALAR [24]. Como se puede ver en la Figura 7.2, el visor se acopla a la montura de unas gafas con cristales transparentes.



Figura 7.2: Teleglass T3-F

Si bien no dispone de capacidad See-Through, el visor es del tipo retráctil y se desplaza mediante un motor eléctrico. Esto aporta flexibilidad al usuario y así le permite poder decidir cuándo ver los subtítulos.

Las características más destacables de las Teleglass T3-F son:

- LCD miniaturizado que emplea tecnología óptica exclusiva para agrandar y mostrar video. La resolución del display es aproximadamente de 230000 pixeles.

- Mecanismo con motor eléctrico para desplegar el LCD. El visor es retráctil y puede ser retirado rápidamente para permitir liberar el área de visión del usuario. El LCD se desplaza entre la posición retraída (Figura 7.3) y la posición de visionado (Figura 7.4) por medio de un motor eléctrico.



Figura 7.3: Visor retráctil plegado

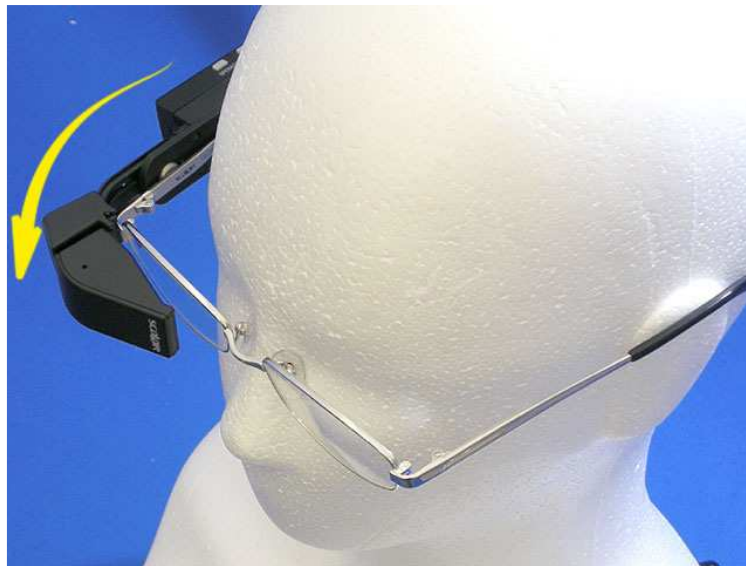


Figura 7.4: Visor retráctil desplegado

- Diseño compacto pero con un gran área de pantalla: El display proporciona una imagen similar a ver una pantalla de 28 pulgadas desde una distancia de 2 metros.

- Muy ligero: El peso de la unidad sin tener en cuenta las baterías es de sólo 35 gramos.
- Alimentado por baterías: La energía es proporcionada por 2 pilas del tipo AA por lo que la unidad puede ser usada en diferentes lugares sin necesidad de cable alimentación. La autonomía aproximada es de unas 4 horas.
- Entrada de video del tipo NTSC compatible con BOB-4.

# CAPÍTULO

## 8

---

### *Texas Instruments CC2430*

*8.1 Consideraciones previas sobre el CC2430DK*

*8.2 Análisis en detalle del SoC CC2430*

*8.3 SmartRF04EB*

*8.4 Z-Stack*



## 8. TEXAS INSTRUMENTS CC2430

En este apartado haremos un análisis más exhaustivo de las principales características del CC2430 por el que finalmente se ha optado. Este examen será tanto a nivel hardware como a nivel software con la pila de protocolo ZigBee desarrollada por Texas Instruments y que recibe el nombre de Z-Stack. Para profundizar más y obtener información adicional, consultar las referencias [25] (CC2430) y [26] (Z-Stack).

El CC2430 se emplea en áreas tan diversas como:

- “Smart Energy“ o eficiencia energética.
- Domótica.
- Automatización de edificios.
- Supervisión y control industrial.
- Medicina y atención hospitalaria.
- Periféricos para PC.
- Control remoto.
- Seguimiento y control de aplicaciones.
- Redes de sensores inalámbricos.
- Sistemas de seguridad y alarma.
- Aplicaciones donde es necesaria la interoperabilidad.
- Aplicaciones que requieren utilizar la banda ISM (2.4 GHz).

Aunque en la comparativa de kits no se comentó, Texas Instruments dispone de dos kits de desarrollo para sus chips CC2430, el CC2430DK y el CC2430ZDK. La única diferencia entre los dos kits es que el CC2430ZDK está totalmente orientado al desarrollo de sistemas ZigBee e incluye más material tanto hardware como software (placas de demostración, Z-Stack, etc.).

Se decidió adquirir el kit CC2430DK ya que es mucho más económico (algo que siempre es importante) y porque el Z-Stack de Texas Instruments es de libre distribución, por lo que podemos descargarlo y utilizarlo libremente.

Este kit puede ser utilizado para desarrollar casi cualquier sistema, desde un simple interruptor de luz a nodos avanzados con múltiples periféricos. El software incluye una librería de interfaz a hardware.

### *8.1 Consideraciones previas sobre el CC2430DK*

En este apartado haremos un resumen de los principales aspectos del kit CC2430DK.

Ya se mencionó en la comparativa entre kits ZigBee que el CC2430DK es una herramienta de Texas Instruments para desarrollar aplicaciones basadas en el estándar

de redes 802.15.4. El kit incluye todo el hardware y el software requerido para evaluar, demostrar, construir prototipos y desarrollar varias aplicaciones basadas en el estándar de redes 802.15.4.

El kit de desarrollo CC2430DK contiene lo siguiente:

- 2 x SmartRF04EB.
- 2 x módulos de evaluación (CC2430EM).
- 2 x Antenas de 2.4 GHz.
- 2 x Cables USB.
- 1 x faja plana de 10 cables para utilizar la SmartRF04EB como un emulador para sistemas externos.

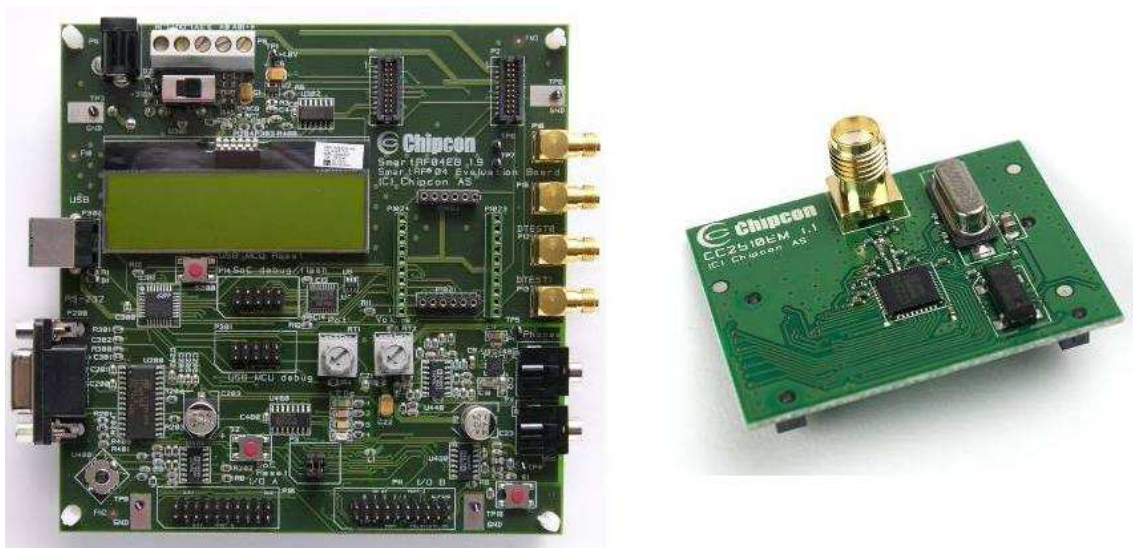


Figura 8.1: Placa SmartRF04EB y módulo CC2430EM

## 8.2 Análisis en detalle del SoC CC2430

El CC2430 se trata de una solución SoC (System on Chip) que cumple las especificaciones IEEE 802.15.4/ZigBee a 2.4 GHz.

Existen tres versiones del chip CC2430 que se diferencian en función de la cantidad de memoria flash que incluyen. Son los CC2430F32/64/128 con 32/64/128KB de memoria respectivamente. En este proyecto emplearemos los módulos que poseen 128KB disponiendo por tanto de la solución más competitiva de todas.

Las características principales del CC2430F128 son:



- Baja potencia

Pueden configurarse cuatro modos de potencia diferentes para reducir el consumo. Sólo se consumen 0,5  $\mu$ A en modo sleep teniendo la posibilidad de despertar el sistema mediante una interrupción externa o tras un tiempo programado. Esto se logra combinando un diseño CMOS totalmente estático de baja potencia con un voltaje de alimentación bajo (2.0V-3.6V).

Además, el tiempo de transición entre modo sleep y modo activo es muy rápido y permite un consumo extremadamente bajo en sistemas de bajo ciclo de trabajo.

- Microcontrolador

Microcontrolador compatible con 8051 de bajo consumo y alto rendimiento. Es un núcleo del 8051 optimizado, que proporciona una capacidad de procesamiento hasta ocho veces mayor que el de un modelo estándar del 8051. Dispone de 128 KB de memoria flash programable en el circuito y 8 KB RAM, de las cuales 4KB con retención de datos en todos los modos de potencia.

El reloj fuente del sistema puede ser un oscilador RC a 16 MHz o un oscilador de cristal a 32 MHz. El oscilador a 32 MHz se utiliza cuando la radio está activa. Soporta depuración interactiva en circuito utilizando el programa IAR Embedded Workbench.

- Periféricos

- DMA.
- Watchdog timer programable.
- Reloj de tiempo real con oscilador de cristal a 32.768 KHz.
- Cuatro timers: uno general de 16 bits, dos generales de 8 bits y uno MAC.
- Dos USARTs programables con soporte para varios protocolos serie. Pueden operar como SPI maestro/esclavo o como UART.
- 21 pines de I/O de propósito general configurables, dos de ellos capaces de proporcionar hasta 20 mA.
- Hasta ocho entradas ADC de 12 bits con resolución configurable.
- Sensor de temperatura.

- Hay disponibles potentes herramientas de desarrollo como IAR Workbench.

- Encriptación/Desencriptación AES por Hardware al disponer de un coprocesador específico para ello.

- Soporte hardware IEEE 802.15.4 MAC

- Generador de preámbulo automático.
- Inserción/detección de palabra de sincronización.
- Computación y comprobación del CRC-16 en el payload de MAC.
- Evaluación de canal libre.

- Detección de energía / indicador digital de la intensidad de las señales en el canal.
- Indicador de la calidad del enlace.
- Coprocesador CSMA/CA.
- Radio digital DSSS a 2.4 GHz integrada
  - Transceptor RF conforme con IEEE 802.15.4 2.4 GHz (basado en el núcleo del chip CC2420).
  - Receptor muy sensible y robusto a interferencias con la ventaja de necesitar pocos componentes externos.
  - Tasa de datos de hasta 250 Kbps.

### 8.2.1 Configuración de pines y puertos I/O

Esta es la distribución de los pines y puertos del CC2430 (Figura 8.2).

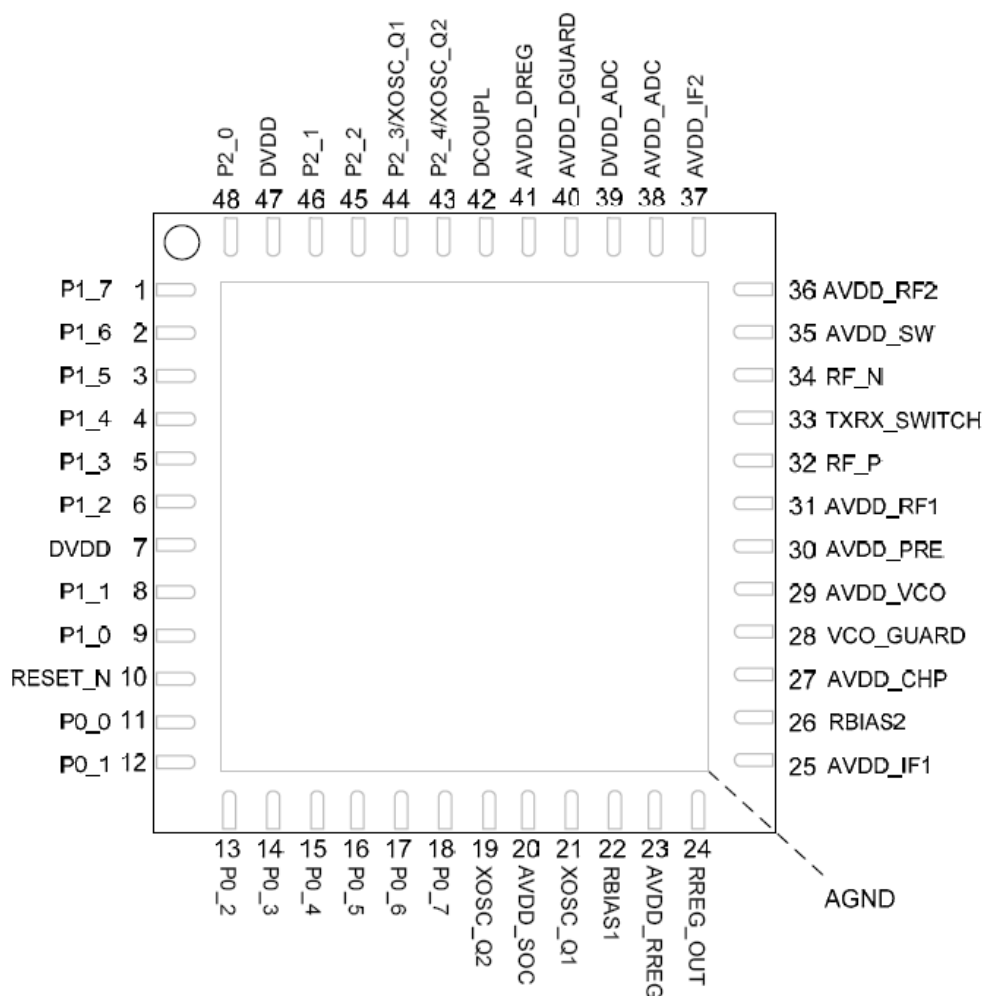


Figura 8.2: Pines y puertos del CC2430

A continuación, en la Tabla 8.1, se procede a la descripción de los pines.

Pin	Nombre del pin	Tipo de pin	Descripción
-	AGND	Tierra	-
1	P1_7	I/O digital	Puerto 1.7
2	P1_6	I/O digital	Puerto 1.6
3	P1_5	I/O digital	Puerto 1.5
4	P1_4	I/O digital	Puerto 1.4
5	P1_3	I/O digital	Puerto 1.3
6	P1_2	I/O digital	Puerto 1.2
7	DVDD	Alimentación (digital)	Alimentación digital 2.0-3.6V
8	P1_6	I/O digital	Puerto 1.1 - soporta hasta 20 mA
9	P1_6	I/O digital	Puerto 1.0 - soporta hasta 20 mA
10	RESET_N	Entrada digital	Reset activo a nivel bajo
11	P0_0	I/O digital	Puerto 0.0
12	P0_1	I/O digital	Puerto 0.1
13	P0_2	I/O digital	Puerto 0.2
14	P0_3	I/O digital	Puerto 0.3
15	P0_4	I/O digital	Puerto 0.4
16	P0_5	I/O digital	Puerto 0.5
17	P0_6	I/O digital	Puerto 0.6
18	P0_7	I/O digital	Puerto 0.7
19	XOSC_Q2	I/O analógica	Pin 2 del oscilador de cristal a 32 MHz
20	AVDD_SOC	Alimentación (analógica)	Alimentación analógica 2.0-3.6V
21	XOSC_Q1	I/O analógica	Pin 1 del oscilador de cristal a 32 MHz
22	RBIAS1	I/O analógica	Resistencia bias externa de precisión
23	AVDD_RREG	Alimentación (analógica)	Alimentación analógica 2.0-3.6V
24	RREG_OUT	Salida de alimentación	Salida del regulador de tensión de alimentación a 1.8V
25	AVDD_IF1	Alimentación (analógica)	Alimentación de 1.8V para el filtro de paso banda del receptor
26	RBIAS2	I/O analógica	Resistencia bias externa de precisión
27	AVDD_CHIP	Alimentación (analógica)	Alimentación de 1.8V para el detector de fase
28	VCO_GUARD	Alimentación (analógica)	Conexión para la protección del VCO
29	AVDD_VCO	Alimentación (analógica)	Alimentación de 1.8V para el VCO
30	AVDD_PRE	Alimentación (analógica)	Alimentación de 1.8V para el pre-escalador
31	AVDD_RF1	Alimentación (analógica)	Alimentación de 1.8V para el LNA y el amplificador de potencia (PA)
32	RF_P	RF I/O	Señal de entrada RF
33	TXRX_SWITCH	Alimentación (analógica)	Voltaje de alimentación para el PA
34	RF_N	RF I/O	Señal de entrada RF
35	AVDD_SW	Alimentación	Alimentación de 1.8V para LNA y PA

		(analógica)	
36	AVDD_RF2	Alimentación (analógica)	Alimentación de 1.8V para los mezcladores
37	AVDD_IF2	Alimentación (analógica)	Alimentación de 1.8V para filtros paso bajo
38	AVDD_ADC	Alimentación (analógica)	Alimentación de 1.8V para las partes analógicas de los ADC y DAC
39	DVDD_ADC	Alimentación (digital)	Alimentación de 1.8V para las partes digitales de los ADC y DAC
40	AVDD_DGUARD	Alimentación (digital)	Conexión de alimentación para el aislamiento digital de ruido
41	AVDD_DREG	Alimentación (digital)	Alimentación digital 2.0-3.6V
42	DCOUPPL	Alimentación (digital)	Alimentación digital de 1.8V
43	P2_4/XOSC_Q2	I/O digital	Puerto 2.4/32.768 KHz XOSC
44	P2_3/XOSC_Q1	I/O digital	Puerto 2.3/32.768 KHz XOSC
45	P2_2	I/O digital	Puerto 2.2
46	P2_1	I/O digital	Puerto 2.1
47	DVDD	Alimentación (digital)	Alimentación digital 2.0-3.6V
48	P2_0	I/O digital	Puerto 2.0

Tabla 8.1: Descripción de los pines del CC2430

Para dar salida a la mayoría de estos pines cada módulo de evaluación CC2430EM dispone de 2 conectores, P1 y P2.

Los conectores P1 y P2 son utilizados para conectar el módulo de evaluación a la SmartRF04EB. Sirven como interfaz para comunicar el chip CC2430 con el resto de periféricos de la placa cuando ambos trabajan conjuntamente.

Además, estos conectores tienen una importancia vital en el proyecto. Esto es así puesto que para integrar el módulo CC2430EM en el prototipo de las gafas se deberán colocar 2 zócalos para los conectores P1 y P2, conectando el chip con el resto de componentes.

Es por ello que hay que conocer perfectamente cuál es la funcionalidad de cada pin. En la Figura 8.3 se muestran las conexiones existentes entre el SoC CC2430 y los conectores P1 y P2.

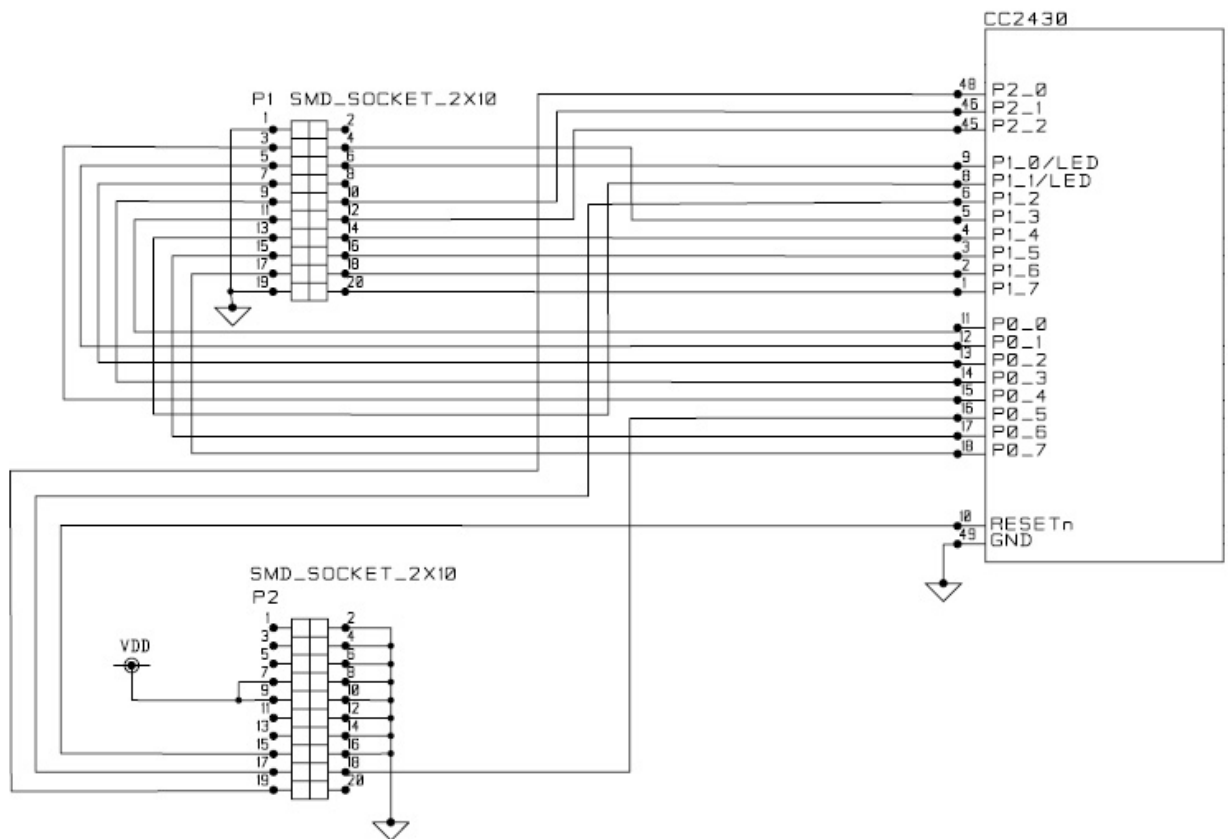


Figura 8.3: Descripción de los pines de los conectores P1 y P2 del CC2430EM

### 8.2.2 Descripción del circuito

En la Figura 8.4 tenemos el diagrama de bloques del CC2430. Los módulos pueden ser divididos, de manera aproximada, en tres categorías:

- Relacionados con la CPU.
- Relacionados con la potencia, distribución del reloj y test.
- Relacionados con el radiotransmisor.

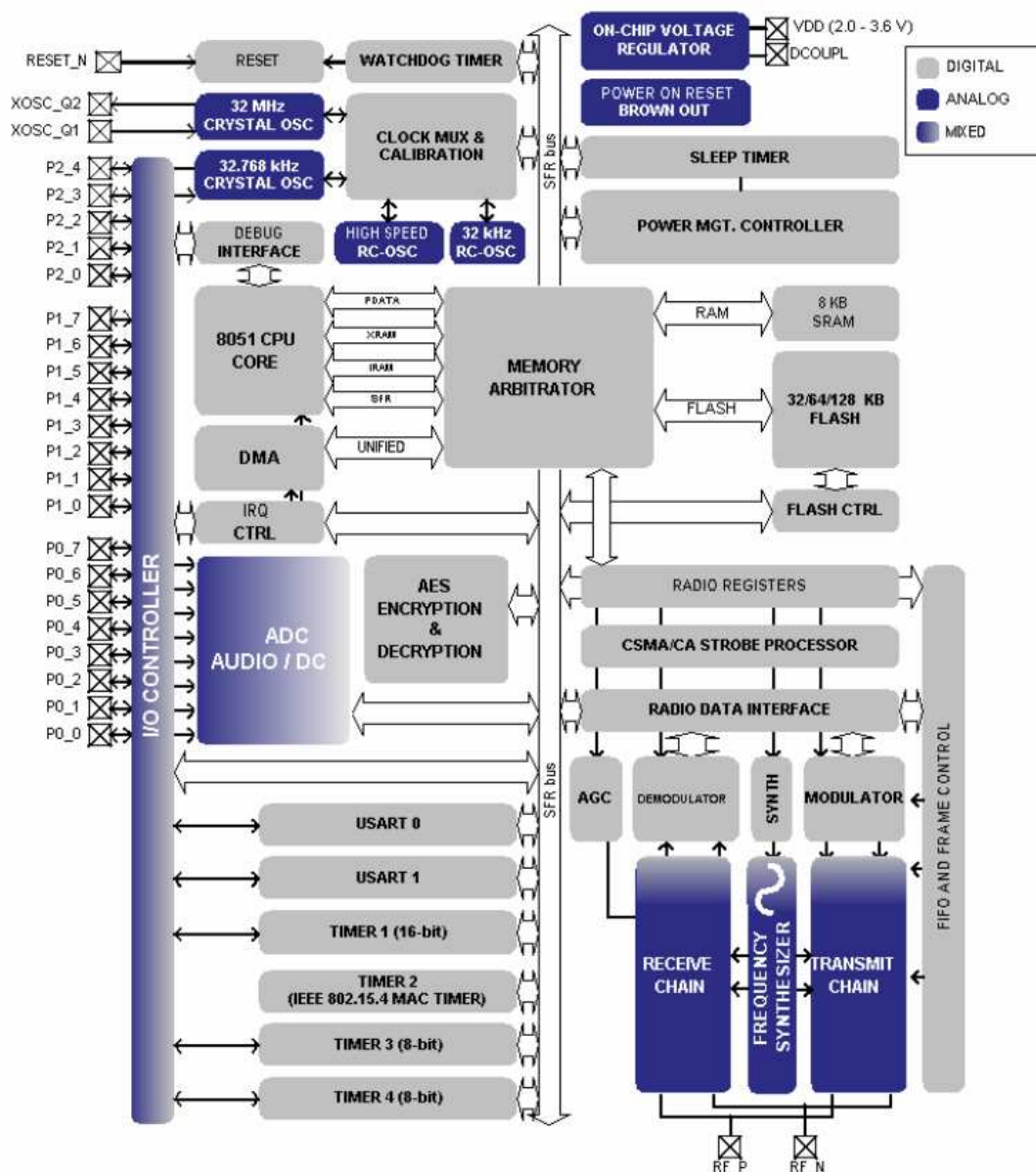


Figura 8.4: Diagrama de bloques del CC2430

- *CPU*

La CPU es un núcleo de un único ciclo compatible con una del tipo 8051. La conmutación/gestión de la memoria se encuentra en el corazón del sistema y conecta la CPU y el controlador DMA con las memorias físicas y todos los periféricos a través del bus SFR.

El gestor de memoria tiene cuatro puntos de acceso a memoria con los que se pueden mapear las tres memorias físicas: 8 KB de SRAM, memoria flash y registros SFR. El gestor de memoria es responsable de realizar la asignación y secuenciar los accesos simultáneos a la misma memoria física. El bus SFR es un bus común que conecta todos los periféricos hardware con el gestor de memoria. Posee acceso a los registros de radio en el banco de registros de radio aunque estos estén mapeados en el espacio de memoria XDATA.

El bloque de memoria flash de 128 KB proporciona una memoria de programa no volátil programable por el dispositivo y mapea en los espacios de memoria CODE y XDATA.

También cuenta con un controlador de DMA de cinco canales en el sistema y accede a la memoria utilizando el espacio de memoria XDATA, teniendo así acceso a todas las memorias físicas. Cada canal es configurado (trigger, prioridad, modo de transferencia, modo de direccionamiento, punteros de origen y destino, y contador de transferencia) con los descriptores de DMA en cualquier lugar de memoria. Muchos de los periféricos hardware dependen del controlador DMA para una operación eficiente (el núcleo AES, controlador de escritura flash, USARTs, Timers, interfaz ADC) mediante transferencias de datos entre una sola dirección SFR y flash/SRAM.

El controlador de interrupciones sirve un total de 18 fuentes de interrupciones, divididas en seis grupos de interrupciones, cada uno es asociado con una de las cuatro prioridades de interrupción. Una petición de interrupción se sirve incluso cuando el dispositivo está en modo reposo (modos de potencia 1-3) llevando de nuevo el CC2430 a modo activo (modo potencia 0).

El interfaz de depuración implementa una interfaz serie propia de dos cables que es utilizada para la depuración en el circuito. A través de esta interfaz de depuración es posible realizar un borrado completo de la memoria flash, controlar qué osciladores están habilitados, parar y empezar la ejecución del programa de usuario, ejecutar instrucciones en el núcleo 8051, incluir breakpoints en el código o ejecutar el código instrucción por instrucción. Utilizando estas técnicas es posible realizar depuración en el circuito y programar memorias flash externas.

El controlador de I/O es responsable de todos los pines de I/O de propósito general. La CPU puede configurar que tanto los módulos periféricos controlen ciertos pines como que los pines estén bajo control software, y también, en los casos que lo permitan, configurar cada pin como entrada o salida. Cada periférico que conecta a los pines I/O puede elegir entre dos localizaciones diferentes de pin I/O para asegurar flexibilidad en distintas aplicaciones.

El timer 1 es un timer de 16 bits con funcionalidad timer/contador/PWM. Tiene un preescalado programable, un valor de periodo de 16-bits y tres canales contadores/capturadores individualmente programables con valor de comparación de 16 bits. Cada uno de los canales del tipo contador/capturador puede ser utilizado como salidas PWM o para capturar los tiempos de los flancos en señales de entrada.

El timer 2 (o timer MAC) está especialmente diseñado para soportar IEEE 802.15.4 MAC. El timer tiene un periodo de tiempo configurable y un desbordamiento de contador de 8 bits que se puede utilizar para llevar la cuenta del número de periodos que se han obtenido.

También hay un registro de captura de 16 bits utilizado para grabar el tiempo exacto en el que el comienzo de un frame de delimitación es recibido o transmitido o el tiempo exacto en el que una transmisión acaba. Existe un registro comparador de salida de 16 bits que puede producir varias peticiones de strobe (iniciar RX, iniciar TX, etc.) en tiempos específicos a los módulos de radio.

Tanto USART 0 como USART 1 pueden ser configurados como SPI maestro/esclavo o UART. Proporcionan doble buffer en ambos, RX y TX, y control de flujo hardware. Cada uno tiene su propio generador de precisión de tasa de transmisión. De esta manera los timers quedan libres para otros usos.

El núcleo de encriptación/desencriptación AES permite al usuario encriptar y desencriptar datos utilizando el algoritmo AES con claves de 128 bits. El núcleo tiene capacidad para soportar las operaciones AES requeridas en seguridad por el IEEE 802.15.4 MAC, la capa de red ZigBee y la capa de aplicación.

- *Funcionalidades*

A continuación describiremos algunas de las funcionalidades más importantes del CC2430 que pueden utilizarse para desarrollar el proyecto.

#### Gestión de energía

El controlador de gestión de potencia controla el uso de los modos de potencia y el reloj para conseguir operar en baja potencia.

El modo de potencia requerido se selecciona mediante los bits de modo en el registro de control SLEEP. Una interrupción habilitada desde los pines del puerto o el sleep timer o Power-On Reset despertarán el dispositivo de otros modos de potencia y lo llevarán al estado PM0 reiniciando los bits del modo.

El CC2430 utiliza diferentes modos de operación, o modos de potencia, para permitir el funcionamiento en baja potencia. Operar en ultra baja potencia se consigue apagando la alimentación de los módulos para evitar el consumo de potencia estática y también apagando los osciladores para reducir el consumo de potencia dinámica.

Los diferentes modos de potencia se designan de la siguiente manera: modo potencia 0, 1, 2 y 3 (PM0..3). El PM0 es el modo activo mientras que el PM3 es el que tiene menor consumo.

- PM0

El PM0 es el modo de operación de completa funcionalidad dónde la CPU, periféricos y el transceptor RF están activos. El regulador de voltaje digital está en marcha. También se puede hacer referencia a este modo como el modo activo y se utiliza para operar normalmente.



- PM1

En PM1, los osciladores de alta frecuencia de 32 MHz y 16 MHz están apagados. El regulador de voltaje y el oscilador de 32 KHz están activos. Cuando el dispositivo pasa de PM1 hacia PM0, los osciladores de alta frecuencia se activan. El dispositivo correrá con el oscilador RC de 16 MHz hasta que el de 32 MHz sea seleccionado como fuente.

- PM2

PM2 posee el segundo consumo de potencia más bajo. En PM2 el Power-On Reset, interrupciones externas, el oscilador a 32.768 KHz y los periféricos de timers del modo sleep están activos. Los pines I/O retienen la configuración del modo I/O y el valor de salida que tenían antes de entrar a PM2. El resto de circuitos internos se apagan incluyendo el regulador de voltaje.

Cuando se entra en PM2, se ejecuta una secuencia de apagado. Típicamente se entra en PM2 cuando se utiliza el timer de sleep como evento para despertar, y también combinado con interrupciones externas. Normalmente se selecciona el PM2 en lugar de PM1 cuando el tiempo de reposo va a exceder los 3 ms, puesto que si el tiempo de reposo es inferior a 3 ms no se reduciría el consumo en comparación con PM1.

- PM3

PM3 es utilizado para operar en el modo de menor consumo de potencia. En PM3 todos los circuitos internos que se alimentan a través del regulador de voltaje son apagados (básicamente todos los módulos digitales, la única excepción es la detección de interrupción y el medidor de nivel del Power-On Reset). También se apagan el regulador de voltaje interno y todos los osciladores.

El reset y las interrupciones del puerto de I/O externo son las únicas funciones que operan en este modo. Los pines I/O retienen el modo I/O y el valor de salida configurados antes de entrar en PM3. Una condición de reset o un acontecimiento de interrupción externa de I/O despertará al dispositivo y lo pondrá en modo PM0. El contenido de la RAM y los registros es preservado en este modo. El PM3 utiliza la misma secuencia power down/up que PM2.

El PM3 resulta muy eficaz para conseguir consumo ultra bajo de potencia cuando se está esperando durante un largo periodo a que suceda un acontecimiento externo.

### Osciladores y relojes

El CC2430 tiene un reloj de sistema interno. La fuente por el reloj de sistema puede ser tanto un oscilador RC a 16 MHz o un oscilador de cristal a 32 MHz. El control del reloj se hace a través del registro SFR CLKCON. El reloj

del sistema también alimenta todos los periféricos del CC2430. También hay una fuente de reloj a 32 KHz que puede ser tanto del tipo RC como un oscilador de cristal. También es controlado por el registro CLKCON.

La elección del oscilador permite obtener un convenio entre la alta precisión en el caso del oscilador de cristal y el bajo consumo de potencia cuando se utiliza un oscilador RC. Hay que tener en cuenta que para el funcionamiento del transceptor RF se requiere el oscilador de cristal de 32 MHz.

Hay dos osciladores de alta frecuencia en el dispositivo:

- Oscilador de cristal a 32 MHz.
- Oscilador RC a 16 MHz.

En la puesta en marcha se utiliza el oscilador RC hasta que el oscilador de cristal está estabilizado. Utilizando el oscilador RC se consume menos pero no es lo suficientemente preciso para utilizar el transceptor RF.

Hay dos osciladores de baja frecuencia en el dispositivo:

- Oscilador de cristal a 32 KHz.
- Oscilador RC a 32 KHz.

El oscilador de cristal está diseñado por trabajar en 32.768 KHz y proporciona una señal de reloj estable para sistemas que requieren precisión temporal. El oscilador RC se utiliza para reducir coste y consumo en comparación con el oscilador de cristal.

### Puertos I/O

El CC2430 tiene 21 pines I/O que pueden ser configurados a I/O digitales de propósito general o como señales I/O de periféricos conectados a los periféricos ADC, timers o USART. El uso de los puertos I/O es totalmente configurable desde el software de usuario a través de un conjunto de registros de configuración. Los puertos I/O tienen las siguientes características clave:

- 21 pines de I/O digitales.
- I/O de propósito general o periféricos.
- Las entradas tienen capacidad de pull-up o pull-down.
- Capacidad de interrupción externa.

La capacidad de interrupción externa está disponible para los 21 pines. Los dispositivos externos pueden generar interrupciones si lo requieren. Esta característica de interrupción externa puede ser utilizada para despertar el dispositivo de un modo de reposo.

Los pines I/O no utilizados deben tener un nivel definido y no se recomienda dejarlos al aire. Una manera de lograr esto es dejar el pin desconectado y configurarlo como pin de entrada de propósito general con resistencia pull-up. Este también es el estado de los pines después de un reset.

Alternativamente el pin puede ser configurado como salida de propósito general. En los dos casos el pin se debe conectar directamente a VDD o a GND con tal de evitar un consumo excesivo.

Cuando se utilizan como I/O de propósito general, los pines se organizan en tres puertos (P0, P1 y P2) de 8-bits. P0 y P1 son puertos de 8 bits, mientras que el puerto P2 sólo tiene utilizables 5 bits. Cada pin de cada puerto puede ser configurado individualmente como I/O de propósito general o periférico. La intensidad de salida es de 4 mA en todas las salidas, excepto P1\_0 y P1\_1 que son de 20 mA.

Se debe tener en cuenta que como regla general sólo dos periféricos pueden ser utilizados al mismo tiempo por puerto de I/O y, por lo tanto, se deben definir prioridades.

### 8.3 SmartRF04EB

La SmartRF04EB sirve como plataforma para los Módulos de evaluación (EM) que usan el chip CC2430. Es la placa de evaluación principal dotada con LCD, interfaz USB, LEDs, potenciómetro, etc. Todas estas funciones están incluidas en la SmartRF04B y permiten un examen más rápido de la interfaz RF y de los periféricos del chip.

Esta placa incluye una interfaz USB que puede ser utilizada como interfaz de emulación por el CC2430. Todos los puertos de I/O del CC2430 están disponibles en los pines de conexión de la placa para permitir que aplicaciones externas accedan fácilmente al CC2430. Estos conectores también son compatibles con sondas de analizadores lógicos para una depuración fácil.

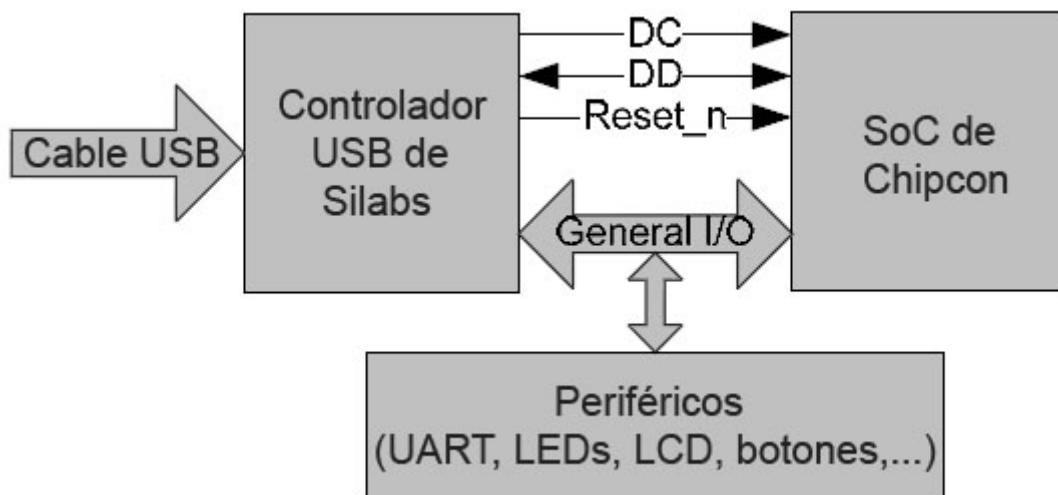


Figura 8.5: Diagrama de la SmartRF04EB

La Figura 8.5 describe el diagrama de funcionamiento de la SmartRF04EB. Un cable USB se conecta directamente del PC al controlador USB. Al conectar un módulo

SoC de evaluación a la SmartRF04EB, el único propósito del controlador USB es traducir las señales USB a la interfaz SoC de depuración. Esta interfaz incluye Debug Clock (DC) y Debug Data (DD). El controlador USB también controla la línea Reset\_n conectada al SoC.

La mayoría de los periféricos de la SmartRF04EB están conectados al controlador USB y al SoC. Esto significa que los puertos I/O de los dos controladores pueden acceder al mismo pin.

Cuando el controlador USB detecta que un SoC está conectado, entonces configurará todas las I/O en modo de three-state o alta impedancia. Esto es así porque de lo contrario la conexión al controlador USB de alguna manera podría llegar a influenciar a estas líneas I/O.

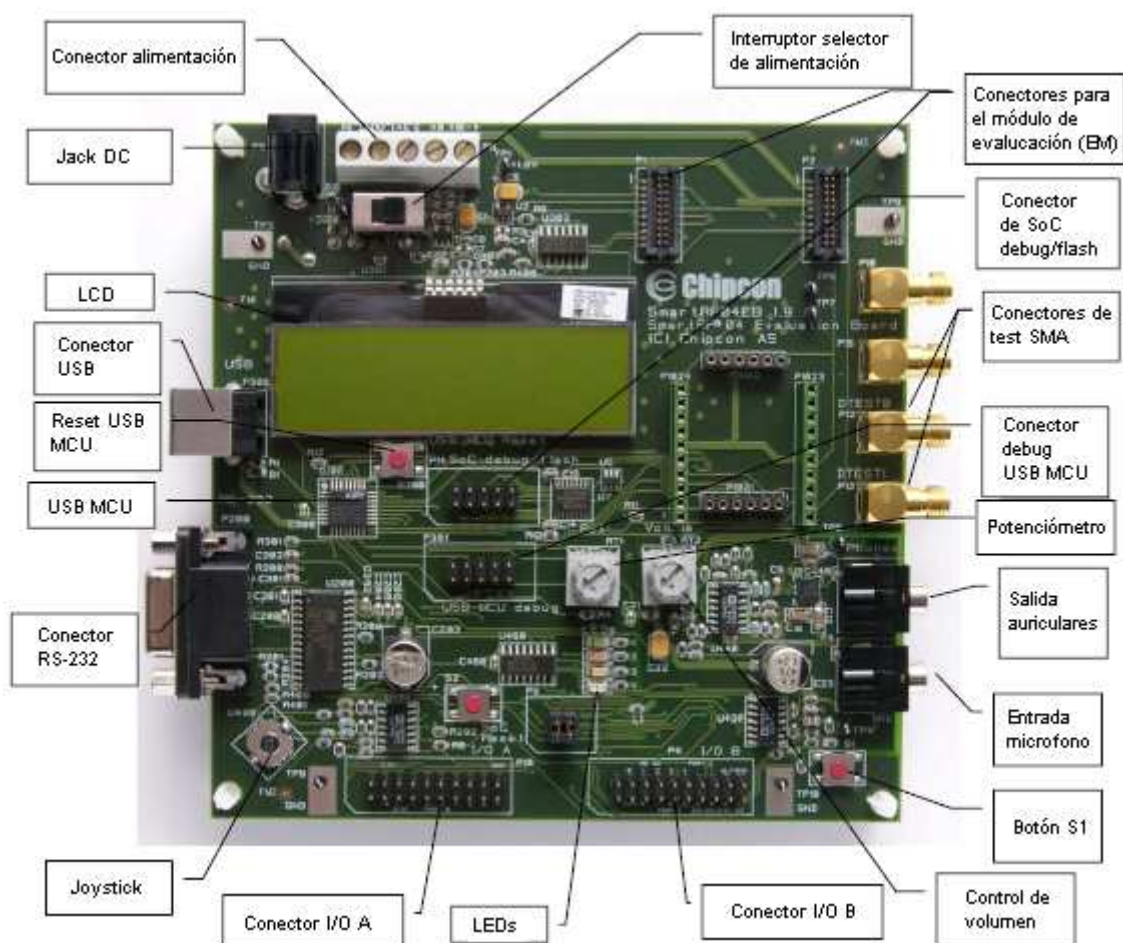


Figura 8.6: Descripción de la placa SmartRF04EB

La Figura 8.6 señala los principales componentes de la SmartRF04EB que son:

- Alimentación SmartRF04EB

Si varias fuentes de alimentación están conectadas a la SmartRF04EB, la placa será alimentada por la fuente que proporcione un mayor voltaje. Puede

alimentarse de varias maneras: mediante un jack DC, una fuente de alimentación de laboratorio, alimentado a través del USB o utilizando baterías.

- Interfaz USB

La interfaz USB se utiliza para hacer de interfaz con el PC, para utilizar el software SmartRF Studio y para programar y depurar.

- Interfaz RS-232

El RS-232 puede ser utilizado por aplicaciones para comunicar el chip con otros dispositivos. La interfaz RS-232 utiliza un dispositivo convertidor de voltaje de forma que el puerto RS-232 sea compatible.

- Interfaz de usuario

La SmartRF04EB incluye un joystick y un botón de pulsación como dispositivos de entrada de usuario. Posee cuatro LEDs y un display LCD de 2x16 caracteres como dispositivos de salida de usuario.

- Conectores EM (P1 y P2)

Como ya se comentó anteriormente, los conectores EM (P1 y P2) son utilizados para conectar el módulo de evaluación a la SmartRF04EB, comunicando el chip CC2430 con el resto de periféricos de la placa.

La SmartRF04EB incluye un interfaz para depurar y programar y así poder desarrollar prototipos. La interfaz de depuración está controlada por dos pines de comunicación. En la SmartRF04EB la interfaz es controlada por el USB MCU. Esto permite a las dos interfaces la programación y emulación utilizando el puerto USB.

- Conectores I/O

Los conectores I/O proporcionan un acceso fácil a todas las señales de los conectores EM. Estos conectores son compatibles con sondas de analizadores lógicos y permiten conectar placas externas de prototipos.

Cuando trabajemos con los módulos CC2430EM sobre la placa SmartRF04EB podemos acceder a los pines/puertos I/O del CC2430 a través de los conectores A (P10) y B (P11) (véase Tabla 8.2). Las hileras de pines P10 y P11 se pueden utilizar para conectar otra PCB o una placa de desarrollo a la SmartRF04EB.

Hemos de tener en cuenta que podemos tener control desde el CC2430 a los periféricos de la SmartRF04EB como joystick, display LCD, potenciómetros, etc. Esto se hace a través de los pines del chip. Por tanto, en el caso que utilicemos alguno de estos periféricos no podremos utilizar los correspondientes pines para otras tareas. Por ello se ha de tener presente qué pines serán utilizados en cada caso.

Conector I/O A (P10)		Conector I/O B (P11)	
Pin	Función	Pin	Función
1	N/C	1	N/C
2	N/C	2	N/C
3	P0_0/MIC_IN	3	VDD
4	VDD	4	P2_0/LED4
5	VDD	5	P1_0/LED1
6	N/C	6	P2_1/DD
7	P0_1/BUTTON_PUSH	7	P1_1/PWM_OUTPUT
8	N/C	8	P2_2/DC
9	P0_2/UART_RD	9	P1_2/LED2
10	N/C	10	P2_3/SDA
11	P0_3/UART_TD	11	P1_3/LED3
12	N/C	12	P2_4/SCL
13	P0_4/RTS	13	P1_4/CSN
14	N/C	14	N/C
15	P0_5/JOY_PUSH	15	P1_5/SCLK
16	N/C	16	RESET_N
17	P0_6/JOY	17	P1_6/MOSI
18	N/C	18	Debug Data Direction (DD_DIR)
19	P0_7/POT	19	P1_7/MISO
20	GND	20	GND

Tabla 8.2: Descripción de los pines de los conectores P10 y P11

- USART

USART 0 y USART 1 son interfaces de comunicación serie que pueden operar separadamente tanto en modo UART asíncrono como modo de interfaz puerto serie (SPI) síncrono. Las dos USARTs tienen idéntica funcionalidad, y están asignadas a pines I/O separados. La Tabla 8.3 es una descripción de cómo están asignados los pines según se la configuración elegida.

Periférico/ Función	P0								P1							
	7	6	5	4	3	2	1	0	7	6	5	4	3	2	1	0
USART 0 SPI			C	SS	M0	M1										
Alt. 2											M0	M1	C	SS		
USART 0 UART			RT	CT	TX	RX										
Alt. 2											TX	RX	RT	CT		
USART 1 SPI			M1	M0	C	SS										
Alt. 2									M1	M0	C	SS				
USART 1 UART			RX	TX	RT	CT										
Alt. 2									RX	TX	RT	CT				

Tabla 8.3: Pines para las diferentes configuraciones USART

### *Modo UART*

Para interfaces serie asíncronas el modo UART es proporcionado. En el modo UART la interfaz utiliza un sistema de dos o cuatro cables, consistente en los pines RXD, TXD y opcionalmente RTS y CTS. El modo de operación de la UART incluye las siguientes características:

- 8 o 9 bits de datos.
- Par, impar o sin paridad.
- Nivel configurable del bit de inicio y parada.
- Configurable si la primera transferencia es LSB o MSB.
- Recepción y transmisión de interrupciones independiente.
- Recepción y transmisión de DMA triggers independiente.
- Estado de error de paridad y framing. El modo UART proporciona transferencias asíncronas totalmente duplex, y la sincronización de los bits en el receptor no interfieren con la función de transmisión. La transferencia de un byte de UART consistente en un bit de inicio, ocho bits de datos, opcionalmente un noveno bit de datos o paridad, y un o dos bits de parada. Tener en cuenta que los datos transferidos se refiere a un byte, aun cuando actualmente los datos pueden consistir en ocho o nueve bits.

### *Modo SPI*

El modo SPI se utiliza para operar en comunicaciones síncronas. En modo SPI, la USART se comunica con un sistema externo a través de una interfaz de 3 o 4 cables. La interfaz consiste en los pines MOSI (Master Out Slave In), MISO (Master In Slave Out), SCK (clock serie) y SSN (Slave Select pin). El modo SPI incluye las siguientes características:

- Interfaz SPI de 3 cables (master) y 4 cables.
- Modos master y esclavo.
- Polaridad y fase del SCK configurables.
- Primera transferencia configurable LSB o MSB.

## **8.4 Z-Stack**

Z-Stack es la pila compatible de protocolos ZigBee desarrollada por Texas Instruments para un creciente conjunto de productos y plataformas basadas en el estándar IEEE 802.15.4. La usada por el CC2430 cumple con la especificación ZigBee 2006.

El conjunto de parámetros de una stack que deben ser configurados a valores específicos se denomina perfil de stack. Estos parámetros que forman parte del perfil de stack están definidos por la Alianza ZigBee. Todos los dispositivos de una red deben conformar el mismo perfil de stack. La Alianza ZigBee definió un perfil de stack para la especificación ZigBee 2006 con el objetivo de promover la interoperabilidad. Todos los dispositivos conformes a este perfil de stack en teoría pueden trabajar en una red con

dispositivos de otros fabricantes que también lo cumplan. Esto es sobre el papel, puesto que se han dado algunos casos de incompatibilidad y por ello se desarrollo ZigBee 2007, no soportado por este kit.

Z-Stack emplea unos recursos mínimos para poder funcionar. Puesto que los dispositivos pueden efectuar diferentes roles, los requerimientos varían de unos a otros. Son necesarios:

- Un microcontrolador de 8 bits.
- 32 KB de memoria si se quiere implementar la pila completa.
- 6 KB de memoria para la pila más sencilla.

Con respecto a la memoria RAM, cada implementación necesita una cantidad diferente en función del grado de optimización de la misma, pero es interesante resaltar que los coordinadores y/o routers tendrán más exigencias puesto que necesitan mantener tablas de los dispositivos de la red, encaminamiento, etc.

Es por ello que, a pesar de las bondades del Z-Stack, hemos de tener mucho cuidado a la hora de diseñar una posible aplicación y debemos tener en cuenta ciertas premisas.

Sabemos que los dispositivos finales (EDs) son los que permiten un reducido consumo energético, pero también es cierto que estos sólo pueden comunicarse con su coordinador y que la latencia de las comunicaciones es inversamente proporcional al consumo de los dispositivos.

También es necesario saber que cuando un ED no está transmitiendo o recibiendo, se desactiva y entra en un estado de bajo consumo o modo sleep. Únicamente despertará de este estado cada cierto tiempo, bien porque esté programado para ello o porque le despierte una interrupción externa.

Todos los mensajes que han de enviarse a un ED han de dirigirse a su coordinador, que los mantendrá en una *caché* hasta que el ED pueda recibirlos. Además aumenta la latencia y la carga del coordinador, pero permite al ED funcionar con baterías debido a su bajo consumo.

Por supuesto, un ED de capacidades reducidas (RFD) no puede desarrollar funciones de encaminamiento pero, ya que es posible tener EDs con plenas capacidades (FFD), técnicamente sí es posible tener dispositivos finales que encaminen paquetes, algo que va en contra de la definición de “dispositivo final”. De todas formas, si el dispositivo ha de encaminar el tráfico de sus vecinos, éste debe ser FFD y no puede estar en modo sleep, puesto que las rutas que contasen con él no serían útiles.

Por todo esto, si deseamos crear una red extensa con muchos dispositivos, hemos de elegir bien quiénes podrán encaminar paquetes y quiénes podrán ahorrar energía.

En la arquitectura que se propone en este proyecto afortunadamente la decisión en este aspecto no resulta difícil. En cada sala existirá un nodo coordinador al que



múltiples EDs en forma de gafas de subtítulo se conectarán para la recepción de los subtítulos.

Una vez aclarado este punto nos centraremos en algunas de las características del Z-Stack.

#### **8.4.1 Z-Stack OSAL**

OSAL es una interfaz de comunicación entre componentes software (API) que permite que dichos componentes en el Z-Stack sean escritos independientemente de las especificaciones del sistema operativo, kernel o el ambiente de tareas (incluyendo lazos de control o sistemas dotados de interrupciones). OSAL se implementa en el dispositivo.

Lo que hace OSAL es proporcionar un conjunto de llamamientos a funciones que actúan como interfaz con los componentes software del Z-Stack. Proporciona las siguientes funcionalidades de forma que es independiente del ambiente de procesamiento:

- Grabación de tareas, inicialización, puesta en marcha.
- Intercambio de mensaje entre tareas.
- Sincronización de tareas.
- Gestión de interrupciones.
- Temporizadores (Timers).
- Asignación de memoria.

#### **8.4.2 Z-Stack API**

Consiste en una aplicación que hace de interfaz de programación por todos los componentes proporcionados dentro del Z-Stack. Estos son los ámbitos que cubren el API:

- ZDO

La capa ZDO proporciona los llamamientos a funciones necesarias para la implementación de todas las peticiones y respuestas definidas en el Perfil de Dispositivo ZigBee (ZDP), y también otras funciones que habilitan los dispositivos a operar como dispositivo ZigBee.

El ZDP describe cómo las características de un dispositivo ZigBee general son implementadas dentro del ZDO. Define descripciones de dispositivo y clúster que utilizan pares del tipo petición/respuesta.

Los clúster se utilizarán cuando enviemos datos por el aire con la finalidad de especificar qué es lo que estamos enviando (petición, respuesta de datos, etc.) y de esta manera identificar qué tipos de datos se están transmitiendo [27]. Es una de las partes en las que se ha de tener más cuidado al diseñarla para poder obtener un sistema que fácilmente modificable, ampliable, etc.

A partir de la definición de mensaje en la estructura de petición, ZDP proporciona la siguiente funcionalidad al ZDO y a las aplicaciones:

- Inicialización de dispositivo de red.
- Descubrimiento de dispositivos y servicios.
- Vinculación de End Points (EPs) y vincular/desvincular servicios.
- Servicio de gestión de red.

El descubrimiento de dispositivo es el proceso por el cual un dispositivo ZigBee descubre otro dispositivo ZigBee. El descubrimiento de servicio proporciona la habilidad a un dispositivo de descubrir los servicios ofrecidos por los otros dispositivos ZigBee de la PAN. Utiliza varios descriptores para especificar las capacidades del dispositivo.

Típicamente, la vinculación se utiliza durante la instalación de una red cuando el usuario necesita vincular dispositivos de control con dispositivos controlados. Particularmente, la vinculación de EPs soporta un método de vínculo simplificado donde se identifican parejas de dispositivos del tipo controlador/controlado.

Los servicios de gestión de red proporcionan la habilidad de recuperar información de gestión de los dispositivos, incluyendo resultados de descubrimiento de red, contenidos de mesa de encaminamiento, calidad de enlace a los nodos vecinos, y contenidos de la tabla de vinculación.

También proporciona la habilidad de controlar la asociación de red mediante la desasociación de dispositivos de la PAN. Los servicios de gestión de la red son diseñados mayoritariamente para que sea el usuario o unas herramientas las que se encarguen de ello.

- AF

La interfaz AF soporta una interfaz a EPs, incluyendo el ZDO, hacia la stack que está por debajo. AF proporciona las estructuras de datos y las funciones de ayuda que se requieren por construir una descripción de dispositivo y es el multiplexor de EP para los mensajes de entrada.

La capa de AF es la aplicación de interfaz “por aire” de la capa APS. Contiene las funciones y usos de aplicación por enviar datos por el aire a través de las capas APS y NWK.

La capa AF proporciona las siguientes funcionalidades a las aplicaciones:

- Gestión de EPs.
- Enviar y recibir datos.

La gestión de EPs hace referencia a que cada dispositivo es un nodo en ZigBee. Cada nodo tiene una dirección larga y corta, la dirección corta del nodo se utiliza

por otros nodos por enviar datos. Cada nodo tiene 241 EPs (el 0 está reservado, del 1 al 240 se asignan a la aplicación).

Cada EP es direccionable por separado. Cuando un dispositivo envía datos este ha de especificar la dirección corta del nodo destino y el EP que recibirá los datos. Una aplicación debe registrar como mínimo un EP para poder enviar y recibir datos en una red ZigBee.

- **APS**

APS API proporciona un conjunto general de servicios de apoyo que son utilizados tanto por el ZDO como por los objetos de aplicación definidos por el fabricante.

La capa APS proporciona las siguientes funcionalidades de gestión accesibles a las capas superiores:

- Gestión de la tabla de vínculos.
- Gestión de la tabla de grupos.
- Lookup Table de direcciones rápido.

Además de las funciones de gestión, la APS también proporciona servicios a datos que no son accesibles a la aplicación.

La tabla de grupo de la APS es una lista de enlace definida con destino a la RAM, a medida que se añaden grupos a la tabla la cantidad de OSAL utilizado se incrementa.

La APS proporciona un par de funciones por realizar conversiones (lookup) de dirección rápidamente. Estas conversiones permiten convertir una dirección corta a una IEEE y a la inversa si la dirección ha sido escrita y almacenada en el gestor de direcciones (capa NWK) o si es tu propia dirección.

- **NWK**

La capa NWK ZigBee proporciona gestión y servicios de datos a los componentes de la capa (aplicación) superior. Estas son las funcionalidades accesibles a las capas superiores:

- Gestión de red.
- Gestión de dirección.
- Variables de red y funciones de utilidad.

Además de las funciones de gestión, la NWK también proporciona servicios de datos que no son accesibles a la aplicación. Las aplicaciones habrían de enviar los datos a través del interfaz de datos AF. El gestor de direcciones proporciona funciones por descubrir routers vecinos, crear redes, configurar un dispositivo como router, añadir dispositivos a la red, etc. El gestor de dirección proporciona una gestión de dirección a bajo nivel.

- HAL API

Esta API proporciona la interfaz para acceder a los timers y a los pines I/O. Es independiente de la plataforma y proporciona un gran conjunto de características para cada servicio. No todas sus características están disponibles para todas las plataformas.

Esta API incluye llamamientos a funciones para:

- Inicializar: Se utilizan por inicializar un servicio y/o configurar parámetros opcionales por los datos específicos de la plataforma. Las funciones de inicialización a menudo son llamadas en la primera etapa, cuando se alimenta el dispositivo.
- Acceso a servicios: Estos llamamientos de funciones pueden acceder directamente a los registros del hardware por leer/escribir ciertos valores del hardware (por ejemplo, controlar los componentes del hardware como los LEDs).
- Callback: Estas funciones deben ser implementadas por la aplicación y son utilizadas para pasar acontecimientos generados por el hardware (interrupciones, contadores, timers, etc.) o por mecanismo de polling hacia la capa superior. Los controladores del HAL proporcionan servicios de Timer, GPIO, LEDs, interruptores, UART, etc. para la capa MAC y superiores.

# CAPÍTULO

## 9

---

### *Diseño software y algoritmos del prototipo*

*9.1 Afrontando el problema*

*9.2 Formato de los datos que se envían por el aire*

*9.3 Diseño Software del Servidor*

*9.4 Diseño Software del enlace ZigBee*



## 9. DISEÑO SOFTWARE Y ALGORITMOS DEL PROTOTIPO

En este capítulo se recogen todos los aspectos que hacen referencia al software creado para el proyecto, tanto en el servidor principal como en el receptor equipado con visor.

Para poder crear este software antes ha sido necesario tener en cuenta una serie de premisas. Pueden incluirse en este punto toma de decisiones en el diseño, como cuál va a ser el formato de los paquetes enviados o qué diagramas de flujo van a ser implementados.

### *9.1 Afrontando el problema*

En el capítulo 3, dedicado a los objetivos del proyecto, se describieron cuales eran los requisitos buscados. El concepto final que se busca es ilustrado, de una forma muy simplificada, en la Figura 9.1.

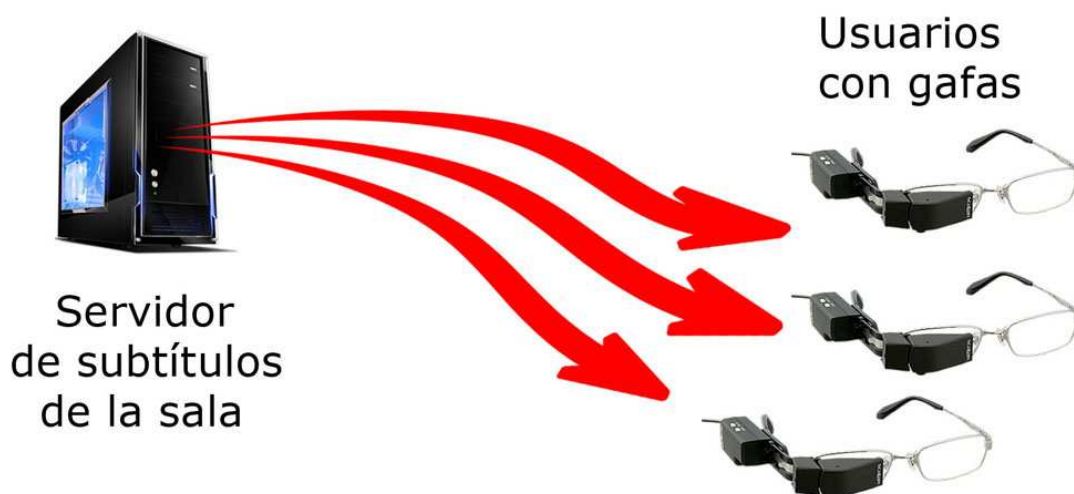


Figura 9.1: Sistema para una sala de cine

En ese concepto aparecen tanto un servidor de subtítulos como un receptor equipado con un visor que porta cada usuario. El servidor es el encargado de enviar los subtítulos a cada receptor.

Para poder afrontar el problema y llegar a obtener una solución para él, una buena opción es dividir el problema principal en sub-tareas más pequeñas y, por tanto, más fáciles de solventar.

Si procedemos a aplicar esto en el concepto inicial tendremos algo similar al diagrama de la Figura 9.2. Aquí ya tenemos un esquema más detallado de cómo va a realizarse la transmisión de los subtítulos.

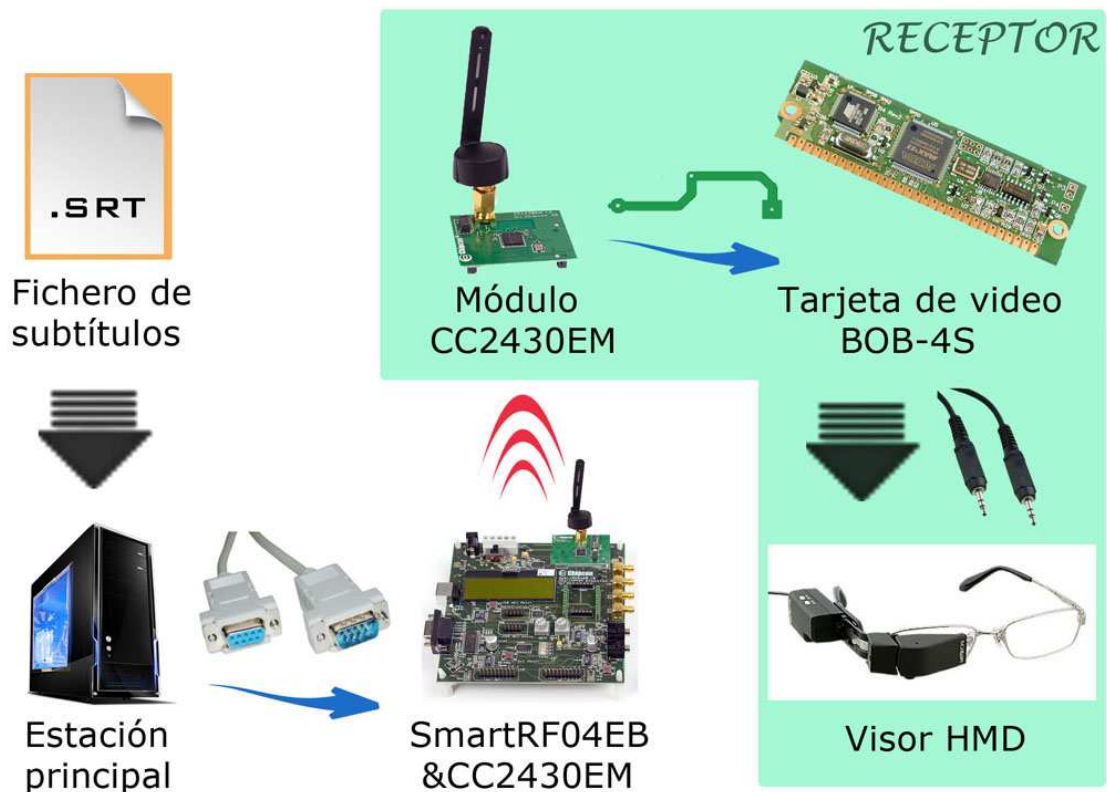


Figura 9.2: Esquema de transmisión de subtítulos

El esquema consiste en varios pasos:

1. El sistema carga los subtítulos que se encuentran en un fichero específico de subtitulado similares por ejemplo a los que tienen la extensión **.SRT**.
2. Una vez los subtítulos son cargados por el programa principal, son procesados y enviados en el instante de tiempo que corresponda al transmisor inalámbrico ZigBee conectado a la estación principal mediante un cable serie.
3. El transmisor conectado a la estación principal compuesto por una placa SmartRF04EB de evaluación y un módulo CC2430EM procesa lo recibido y lo transmite vía radio al receptor.
4. El módulo CC2430EM con el que está equipado el receptor recibe los mensajes que contienen los subtítulos. Después de procesarlos y quedarse sólo con el idioma seleccionado, envía esos datos por puerto serie a la tarjeta de video.
5. La tarjeta de video interpreta los comandos y los datos recibidos y genera una señal de video.



6. La señal de video es mostrada en la pantalla del visor.

El haber podido dividir en sub-tareas el proyecto nos resultará de gran utilidad cuando llegue el momento de diseñar los diagramas de flujo.

## 9.2 Formato de los datos que se envían por el aire

Éste es uno de los puntos clave del proyecto dado que la estructura de los datos será común a todos los dispositivos. Debe permitir cierta flexibilidad puesto que debemos asegurar que las modificaciones que pudiesen existir en un futuro permitan mantener ese formato en la medida de lo posible, siendo de esta forma compatible con versiones anteriores.

En cada trama de datos enviada a las gafas de cada usuario la información que se pretende enviar son los subtítulos de la película. Como hay que ser capaces de subtítular en varios idiomas el formato elegido es el mostrado en la Figura 9.3.

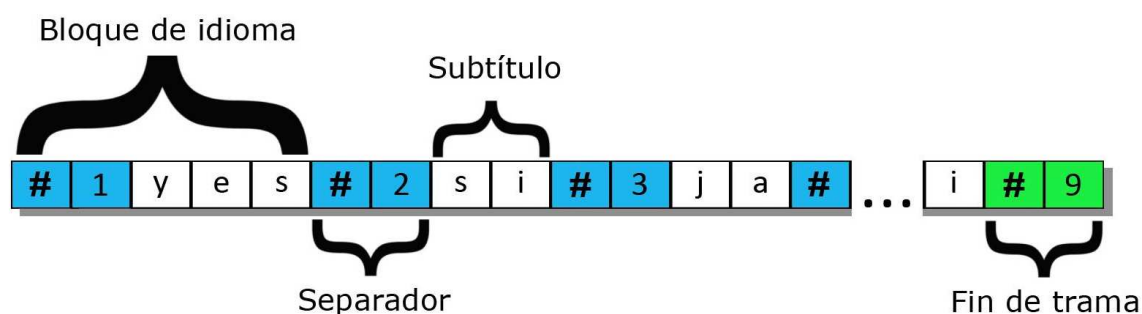


Figura 9.3: Formato de las tramas de subtítulos

Se puede observar como cada trama está compuesta por los diferentes bloques de idiomas concatenados uno tras otro, con un indicador al final de cada trama. Cada bloque de idioma consta de un separador que indica el inicio del bloque además de su número seguido del subtítulo propiamente dicho.

Dado que el final de la trama de datos lo marcan los símbolos # y 9, se deduce que el sistema es capaz de transmitir a la vez hasta 8 idiomas diferentes si usamos números como separadores. Si fuese necesario transmitir más de 8 idiomas podrían usarse también letras [a..z] y [A..Z] como separadores para ampliar el sistema.

## 9.3 Diseño Software del Servidor

El papel de servidor principal de subtítulado en este proyecto lo hace un PC donde corre el programa principal.

### **9.3.1 LabVIEW**

Para implementar el software del servidor de subtítulos se ha optado por usar LabVIEW. Ya fue utilizado con buenos resultados para programar parte del código del primer prototipo inicial. De esta forma, se puede aprovechar una parte del código que se utilizó previamente. También resulta interesante su empleo dado que el CESyA dispone de licencias para su utilización y no hay que realizar mayores gastos en la adquisición de nuevo software.

LabVIEW es una herramienta gráfica creado por la empresa National Instruments para pruebas, control y diseño mediante la programación. El lenguaje que usa se llama lenguaje G, donde la G simboliza que es lenguaje Gráfico [28]. Esto significa que los programas no se escriben, sino que se dibujan, facilitando su comprensión.

Entre los objetivos de LabVIEW están la reducción del tiempo de desarrollo de aplicaciones de todo tipo. Con LabVIEW pueden crearse programas equivalentes a millones de páginas de código para aplicaciones complejas, etc.

Su principal característica es la facilidad de uso, válido para programadores profesionales como para personas con pocos conocimientos en programación. Este último grupo de gente puede hacer programas relativamente complejos que les resultarían prácticamente imposibles de hacer con lenguajes tradicionales.

Algunas de sus características que pueden ser interesantes para este proyecto son:

- Interfaces de comunicaciones
  - Puerto serie
  - TCP/IP, UDP, DataSocket
  - USB
- Capacidad de interactuar con otros lenguajes y aplicaciones
  - .DLL
  - .NET
  - ActiveX
- Visualización y manejo de gráficos con datos dinámicos.
- Sincronización entre dispositivos.

### **9.3.2 Diseño y diagrama de flujo del Servidor**

En los objetivos del capítulo 3 se planteaba una ampliación que incluía la comunicación directa entre el sistema de proyección y el servidor principal de subtitulado.

Esto se ha tenido en cuenta en los diagramas de flujo del servidor principal y del sistema de proyección que están expuestos en la Figura 9.4.

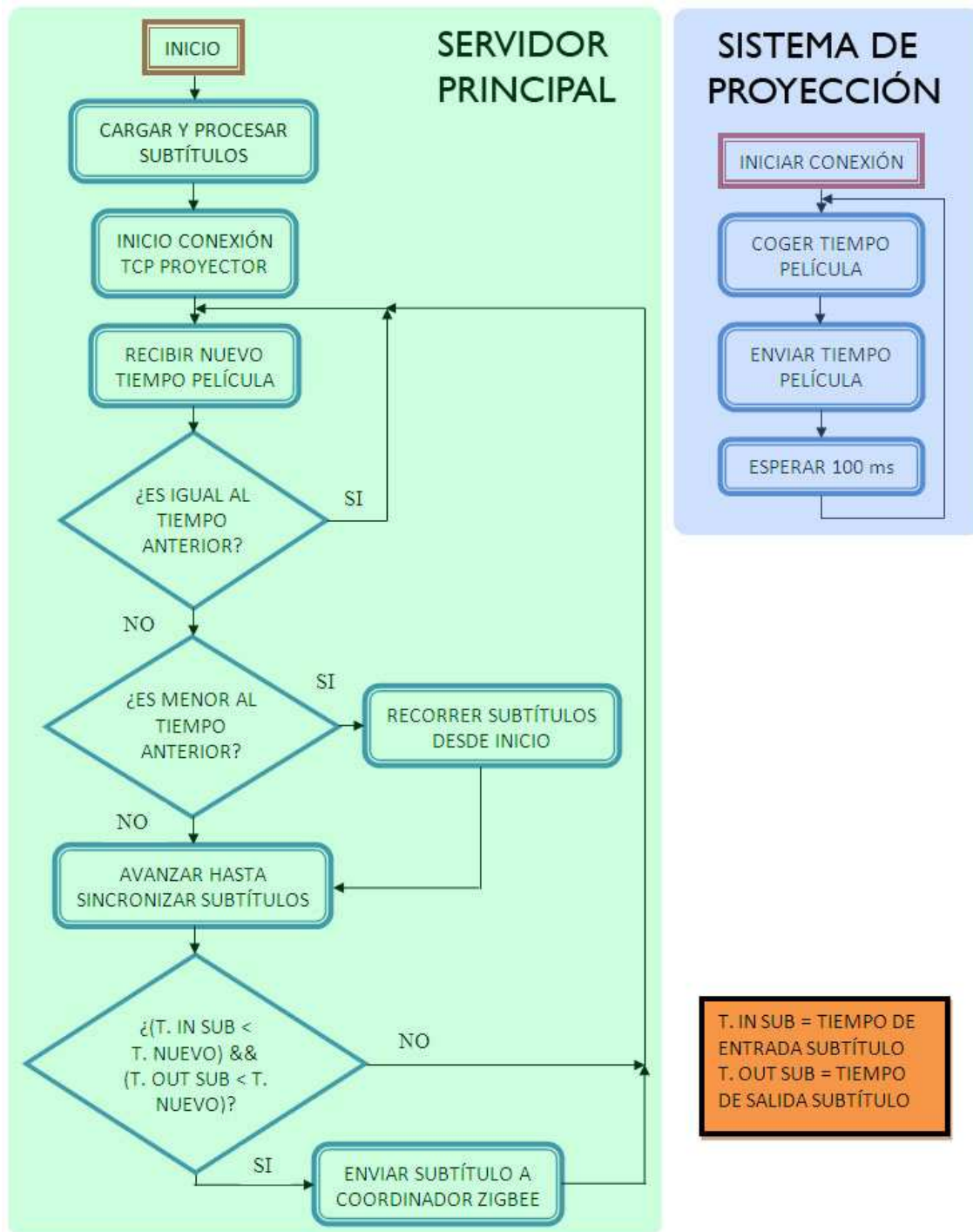


Figura 9.4: Diagrama de flujo del servidor y del sistema de proyección

En el diagrama de flujo del sistema de proyección primero se espera a establecer la conexión con el servidor principal. Una vez existe la conexión TCP entre ambos el sistema de proyección se limita a enviar cada 100 ms el instante de tiempo que se está reproduciendo.

En el servidor principal son cargados los subtítulos obtenidos de la base datos. Además, son procesados para adaptarlos a un lenguaje que la tarjeta de vídeo BOB4 situada en el receptor puede interpretar.

Después se establece la conexión TCP con el sistema de proyección para poder recibir cada 100 ms el instante de película que está siendo reproducido.

Si los tiempos que se reciben son comparados con los anteriores se puede saber si la película avanza normalmente, está en pausa o si hubo un salto temporal tanto hacia adelante como hacia atrás.

Además, cada subtítulo tiene un tiempo de entrada y un tiempo de salida (T. IN SUB y T. OUT SUB en la diagrama). Cuando estamos dentro de estos dos tiempos se transmite un mensaje por el puerto serie con el subtítulo con destino al Coordinador ZigBee.

Teniendo claro esto pasamos a describir como se han implementado con el programa LabVIEW dichos diagramas. En primer lugar, en la Figura 9.5 tenemos el panel frontal que ve el operador y donde se encuentra el reproductor.

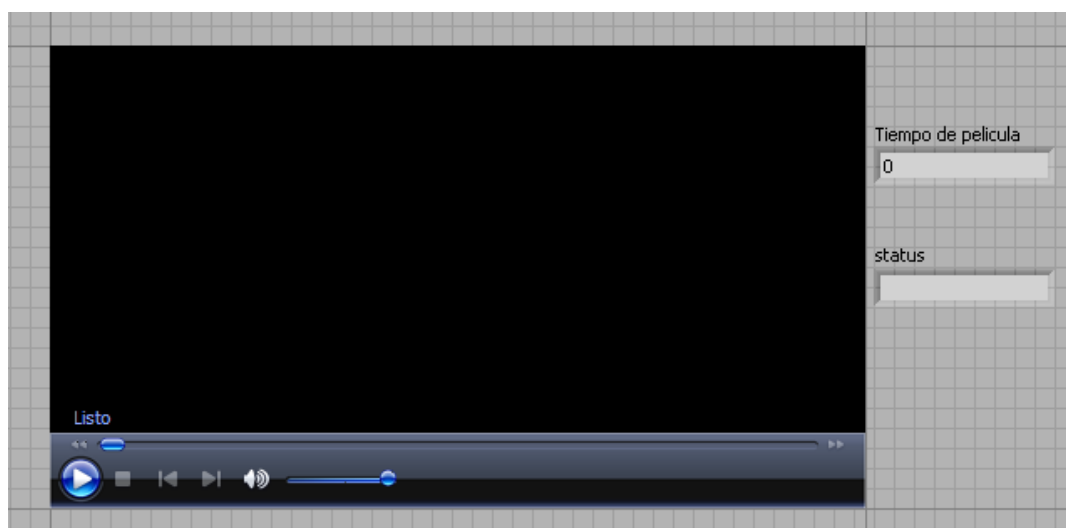


Figura 9.5: Panel frontal del sistema de proyección

En el código gráfico del sistema de proyección (Figura 9.6) se hace necesario el uso de la librería ActiveX para capturar los instantes de tiempo de reproducción de la película. También se incluye los instrumentos necesarios para poder establecer la conexión TCP con el servidor principal.





Luego existe una sección (Figura 9.10) dedicada a la transmisión de los mensajes con subtítulos a través del puerto serie con destino al Coordinador ZigBee. Se aprecian las pausas forzadas en el sistema para evitar fallos durante la transmisión.

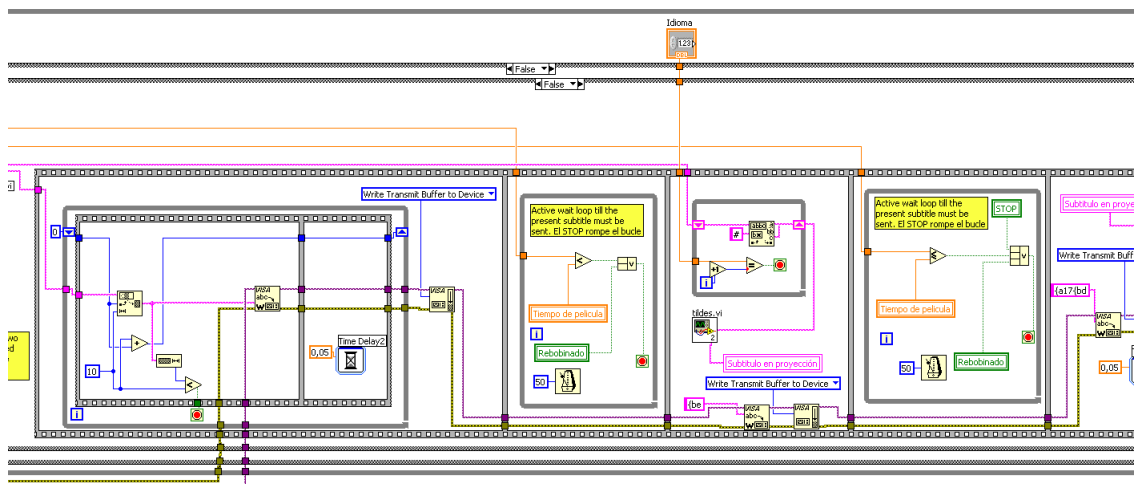


Figura 9.10: Código para la transmisión de los subtítulos por puerto serie

## 9.4 Diseño Software del enlace Zigbee

Una vez está diseñado el servidor principal de subtitulado hay que pensar cómo va a hacerse la comunicación a través del enlace ZigBee. En este punto intervienen el nodo coordinador conectado por puerto serie al PC y un módulo CC2430EM emplazado en el receptor con las gafas.

### 9.4.1 IAR Embedded Workbench (EW8051)

Para programar los chips CC2430 se ha decidido usar IAR Embedded Workbench. IAR Embedded Workbench es el conjunto de herramientas de desarrollo de software recomendadas por Texas Instruments.

Esta herramienta soporta gestión de proyectos, compilación, descarga y depuración para varios procesadores basados en el 8051, incluyendo la familia CC2430. La versión de IAR que se ha usado para este proyecto y que es compatible con el Z-Stack es la 7.50A.

El lenguaje de programación usado para los módulos CC2430EM es el lenguaje C. También es necesario utilizar software adicional como es el Z-Stack descrito en el capítulo 8.

#### 9.4.2 Diseño y diagrama de flujo del enlace ZigBee

En el enlace ZigBee deben interactuar el Coordinador conectado al servidor principal de subtítulo con el receptor de las gafas. Sus diagramas pueden verse en la figura 9.11.

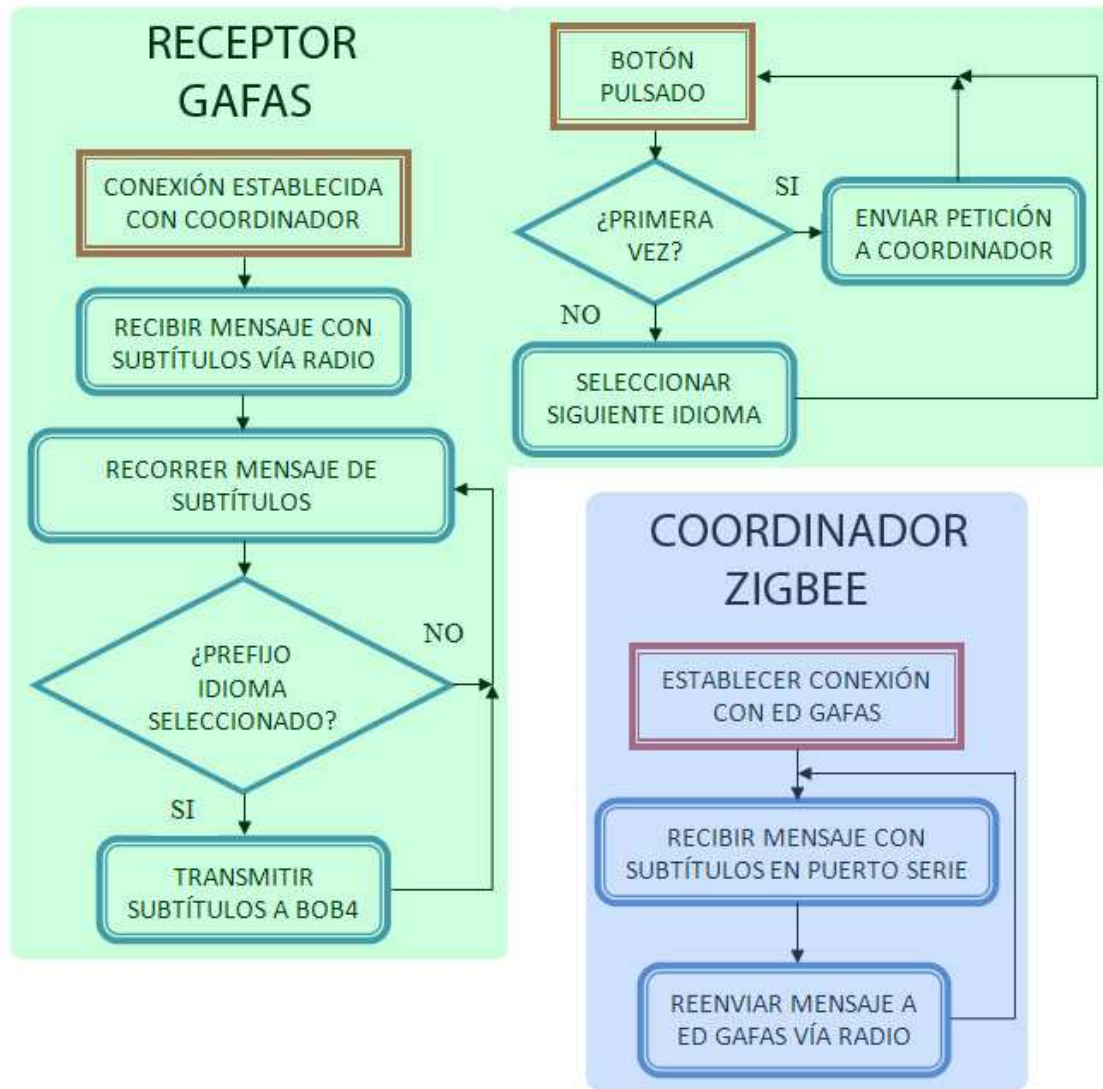


Figura 9.11: Diagrama de flujo del Coordinador ZigBee y del Receptor

En el diagrama de flujo del Coordinador se ve como éste se dedica a reenviar al receptor todos los mensajes que le llegan provenientes del servidor por el puerto serie. Esto se hace a través de un enlace radio establecido entre ambos.

Cada mensaje recibido en el receptor, que siempre sigue el mismo formato descrito en el apartado 9.2, es recorrido hasta encontrar el prefijo del idioma que se encuentra seleccionado. En ese momento todos los caracteres de ese idioma son transmitidos por medio del puerto serie a la tarjeta de video BOB-4S que se encargará de generar la señal de video para las gafas.



El receptor dispone de un botón que tiene 2 funciones. La primera vez que se pulsa realiza una petición de conexión al Coordinador ZigBee para poder establecer la conexión. Las pulsaciones posteriores sirven para ir iterando entre los diferentes idiomas de forma cíclica.

En cuanto a la implementación, todo ha sido programado con lenguaje C en la capa de aplicación de la pila Z-Stack. El código incluye la transmisión de los comandos de inicialización de la tarjeta de vídeo así como la configuración del puerto serie. Para las transmisiones por el puerto serie se usa la interfaz HAL dedicada a la interacción con el Hardware. Dichas comunicaciones ocurren en ambos extremos, el servidor principal con el Coordinador y el receptor con la tarjeta de vídeo BOB-4S.

De igual modo se utilizan métodos de la interfaz HAL para controlar el funcionamiento de varios pines I/O, como los del puerto serie, LED o el botón.

Las comunicaciones se producen de la siguiente manera: A partir del evento de que hay subtítulos listos para enviar, el servidor ejecuta una función envío de subtítulos y transmite un mensaje con los subtítulos. Cuando al dispositivo receptor le llega el mensaje con subtítulos salta una interrupción y al ver que el evento es de recepción de mensaje ejecuta una función para procesar los subtítulos. Tras quedarse con el subtítulo del idioma seleccionado lo reenvía por puerto serie a la tarjeta de vídeo.

Además de para la tarea de recepción de mensajes, incluyendo tanto los que llegan por puerto serie como los que se envían por el aire, el manejador de eventos se utiliza cuando el usuario pulsa el botón.

Con cada pulsación se itera entre los idiomas disponibles. Cuando un idioma es seleccionado, se imprime un mensaje en el visor indicando el número de idioma. Después de mostrarse durante 2,5 segundos el mensaje desaparece y se comienza a mostrar los subtítulos normalmente. Para lograr todo esto se ha hecho necesario el uso de un timer.

Por último hay que destacar la implementación de un algoritmo en el receptor para saber cuántos idiomas se están recibiendo en cada momento. Esto es muy útil puesto que el receptor se adapta automáticamente al número de idiomas cargados en el servidor de subtítulos.



# CAPÍTULO

## 10

---

### *Características, diseño y construcción del prototipo*

*10.1 Características*

*10.2 Diseño del circuito impreso*

*10.3 Construcción del prototipo*



## 10. CARACTERÍSTICAS, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO

### *10.1 Características*

Para lograr los objetivos marcados se decidió que el prototipo final gozase de las siguientes características.

- Zócalos del CC2430EM

Para poder acoplar el módulo CC2430EM al circuito es necesario incluir 2 zócalos de 20 pines cada uno sobre la placa. Esto es importante porque con ellos se evita que el CC2430EM vaya soldado a la placa. Así el módulo de una forma muy simple siempre se podrá conectar y desconectar para ser reprogramado en caso de ser necesario.

- 2 LEDs

Se pensó en que podría resultar útil incluir en el circuito 2 LEDs. El primer LED de color rojo indica si el circuito está siendo alimentado y el segundo LED de color azul indica si el enlace inalámbrico ZigBee está funcionando correctamente.

- Interruptor

Este se incluye para poder encender y apagar toda la electrónica. Así se puede ahorrar carga de batería mientras no se está usando el dispositivo.

- Botón

Se dota al prototipo de un pequeño botón para, en primer lugar, realizar la petición de establecer un enlace ZigBee con la estación principal y, una vez se ha conseguido esto, poder seleccionar el idioma de subtítulo mediante sucesivas pulsaciones rotando de idioma de forma cíclica.

- Salida de video

Conector tipo jack de 3.5 mm para conectar las gafas de subtítulo que extrae las imágenes con subtítulos directamente de la tarjeta de video.

- Conector mini USB

Este conector se incluyó por dos motivos. El primero es aprovechar el hecho de la existencia del regulador de tensión que admite diferentes tensiones de entrada obteniendo a la salida 3.3V. En el caso de que no dispusiésemos de baterías cargadas pero si tuviésemos por ejemplo un PC cerca podremos usar un cable

mini USB para obtener 5V de alimentación, logrando de esta forma que el circuito funcione.

El segundo motivo es que podemos recargar las baterías usando esta conexión si usamos un cargador apropiado conectado a la toma. Además, debido a un acuerdo entre las principales compañías este va a ser el conector universal para los cargadores de móvil, lo cual es una ventaja añadida.

- Regulador de Voltaje

Dado que el voltaje de las baterías disponibles es de 3.6-3.7V y ese voltaje resulta excesivo para el funcionamiento del módulo CC2430EM se decidió incluir un regulador de tensión que convirtiese la tensión de entrada a 3.3V, la cual es una tensión apta para alimentar todos los componentes del circuito.

La elección del regulador de tensión del circuito merece una mención especial aparte. Mientras se analizaba la situación, hubo que enfrentarse al problema de cómo alimentar los componentes del receptor. La tensión suministrada por las baterías era superior al límite impuesto por el módulo CC2430EM.

Para solucionarlo se decidió incluir en el circuito un regulador de tensión que proporcionase 3.3V a la salida. Además, durante unas pruebas se comprobó que el consumo máximo del circuito podía alcanzar los 120 mA. El tamaño debería ser lo más pequeño posible y también se pensó que resultaría interesante que dicho regulador pudiese admitir un rango más o menos amplio de tensiones de entrada. Esto es algo que da mucha flexibilidad para alimentar el circuito de diferentes maneras.

Con todos estos requisitos en mente se optó por el regulador LP2985IM5-3.3 de 150 mA de corriente máxima. Dicho modelo se caracteriza por admitir un rango de tensiones comprendido entre 2.5V y 16V. Este aspecto fue fundamental para ser el elegido, ya que es capaz de seguir suministrando 3.3V a pesar de ser alimentado a su entrada con tensiones inferiores a dicho valor. Otros reguladores de tensión no pueden conseguir esto, puesto que necesitan una tensión mínima de 3.7V a su entrada para seguir funcionando.

## *10.2 Diseño del circuito impreso*

Un paso imprescindible para la construcción final del prototipo es el diseño y fabricación del circuito impreso donde estarán conectados eléctricamente todos los componentes.

OrCAD ha sido el programa empleado para la elaboración del circuito impreso o PCB. OrCAD es un conjunto de herramientas de software utilizadas principalmente para la automatización de diseño electrónico. El software es utilizado por los ingenieros principalmente para diseño y simulación de circuitos impresos.

Entre los programas disponibles en OrCAD se encuentra Layout Plus, con el que se ha elaborado la placa de circuitería de las gafas de subtítulo, incluyendo los footprints de los dispositivos que la componen y las pistas que los unen entre sí.

Antes de proceder a crear ninguna placa de cobre para ahorrar costes se testearon partes del circuito en una placa protoboard. Por ejemplo, en esta etapa se comprobó si el conexionado de los pines de la tarjeta de video era el correcto para la velocidad a la que íbamos a transmitir los subtítulos.

Acabada esta etapa se realizaron dos diseños de placas de cobre. Hubo un primer diseño inicial con funcionalidad limitada pensado para realizar pruebas completas de los sistemas principales, sobre todo para comprobar el funcionamiento del módulo CC2430EM de forma autónoma, esto es, sin la placa SmartRF04EB. Aquí se tuvieron que crear nuevos footprints para algunos de los componentes como los zócalos del módulo CC2430EM y el regulador de tensión puesto que no existían en los definidos por OrCAD.

Una vez acabadas las pruebas de forma exitosa sobre esa primera placa de cobre, se pasó a elaborar la placa definitiva con todas las funciones como LEDs, pulsadores, etc. Además se tuvo en mente el poder obtener un tamaño de placa lo más reducido posible que pudiese entrar en un pequeño contenedor de plástico. De esta forma tendríamos una estructura exterior que diese mayor robustez al circuito.

Dado el limitado espacio del contenedor se barajaron las opciones de usar 2 tipos de baterías recargables de diferentes formatos, optándose finalmente por un porta-baterías de tres pilas recargables de formato AAA. Dicho porta-baterías se adaptaba mejor por poseer una forma más cuadrada.

El circuito diseñado con el programa Layout Plus de OrCAD de esa placa definitiva se puede ver en la Figura 10.1. Las dimensiones finales fueron de 92x42 mm por lo que tiene un tamaño reducido.

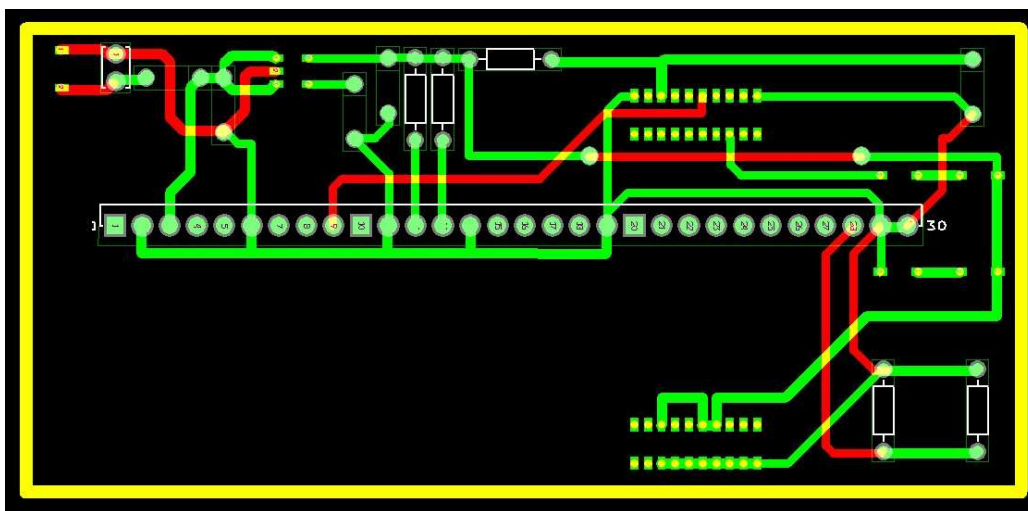


Figura 10.1: Layout del circuito definitivo

### 10.3 Construcción del prototipo

Una vez estuvo terminado el diseño se procedió a solicitar su fabricación. Con la placa construida hubo que realizar los taladros para los pines y así poder soldar los componentes (proceso mostrado en la Figura 10.2).

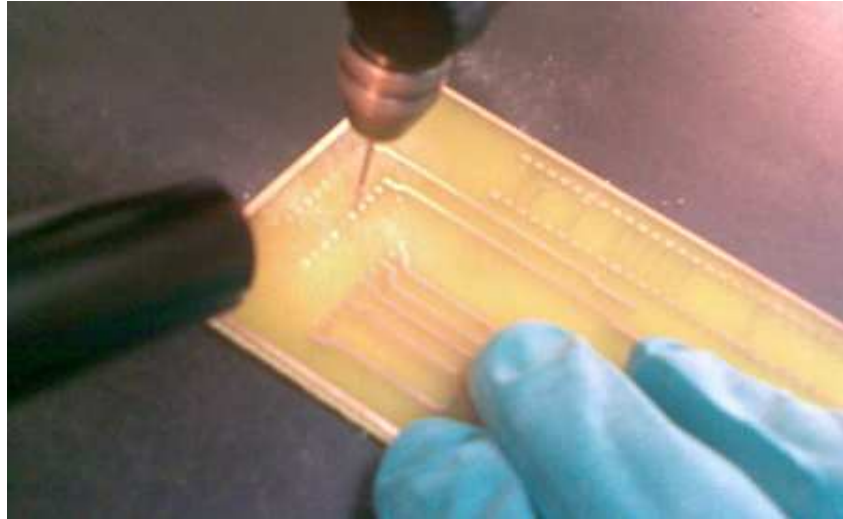


Figura 10.2: Proceso de taladro

Una vez estuvieron los taladros listos se procedió al soldado de los distintos componentes. El resultado final puede verse en la Figura 10.3. A primera vista se ven el módulo CC2430EM, el botón, la salida de video donde conectar las gafas, el porta-baterías y el interruptor.



Figura 10.3: Prototipo terminado



A continuación se incluyen algunas imágenes para mostrar algunos detalles importantes. En primer lugar, en la Figura 10.4 tenemos una foto que nos permite ver donde está situado el regulador de tensión LP2985IM5-3.3 de montaje superficial.

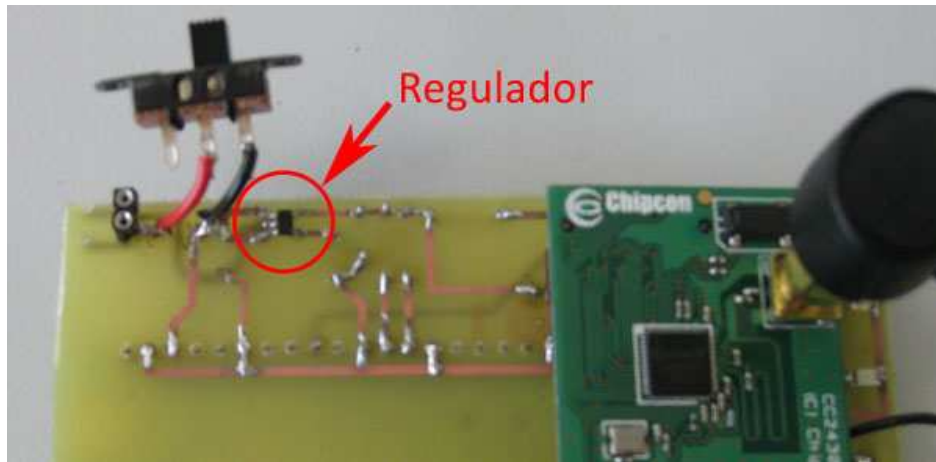


Figura 10.4: Detalle del regulador de tensión

Otro aspecto a destacar son los zócalos para poder colocar el módulo CC2430EM y que están señalados en la figura 10.5. Como ya se ha dicho, gracias a ellos podremos conectar y desconectar el módulo ZigBee de una manera muy sencilla y cómoda por alguna causa, como por ejemplo en el que caso de que se quiera actualizar el software.

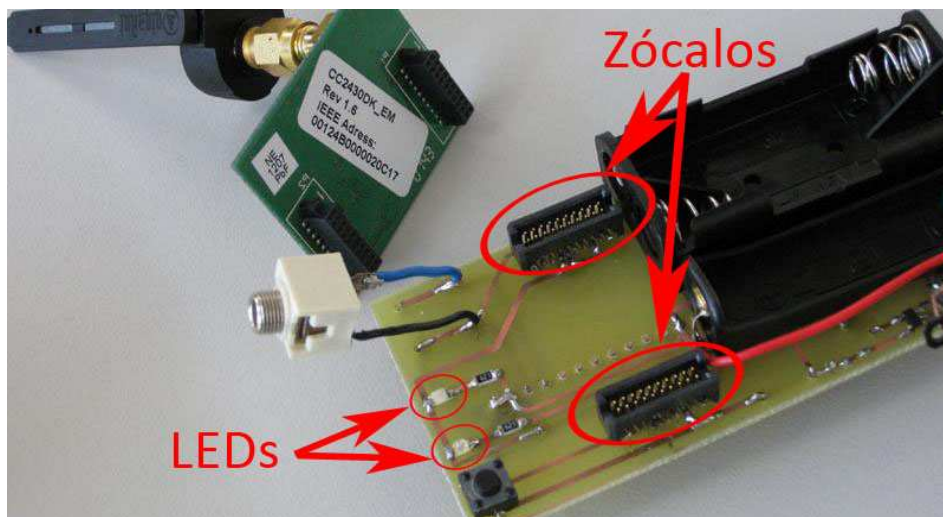


Figura 10.5: Detalle de los zócalos para conectar el módulo CC2430EM

También pueden apreciarse los dos diodos LED con sus las resistencias de polarización. Dado el reducido espacio disponible estos componentes fueron escogidos del tipo de montaje superficial.

En la Figura 10.6 observamos como en la cara posterior de la placa está soldada la tarjeta de video BOB-4S junto con algunos componentes secundarios como resistencias de pull-up y condensadores necesarios para hacer funcionar correctamente el regulador de tensión.



Figura 10.6: Vista de la cara inferior donde está la tarjeta BOB-4S

Las dimensiones de la placa fueron impuestas por el contenedor de plástico disponible. Cuando estuvo completamente terminado se comprobó que la placa entraba en el habitáculo y que se aprovechaba al máximo el espacio disponible (Figura 10.7).



Figura 10.7: Prototipo en su contenedor

# CAPÍTULO

## 11

---

### *Pruebas y resultados*

#### *11.1 Resultados académicos*



## 11. PRUEBAS Y RESULTADOS

Se han realizado varias pruebas para evaluar las prestaciones del nuevo prototipo gafas de subtítulo cerrado. Se ha tratado de abarcar la mayor parte de sus características y comprobar su correcto funcionamiento. Básicamente las pruebas se dividieron de la siguiente manera:

- Prueba del Programa Principal

Se ha testado el programa, poniendo especial detalle en que no se bloquea ni produce excepciones ni errores críticos tal y como sucedía en ciertas ocasiones en el programa del que se partió de base.

Se ha comprobado que las opciones de parada, pausa y reproducción funcionan. También se ha visto que cuando se da un salto temporal en la barra de reproducción tanto hacia delante como hacia atrás los subtítulos siguen estando sincronizados.

Además, se ha comprobado que con la pulsación del botón los idiomas rotan de forma cíclica y el mensaje mostrado en pantalla indicando el idioma seleccionado desaparece al cabo de 2,5 segundos.

Hubo problemas para transmitir los subtítulos desde el PC a la placa de desarrollo SmartRF04EB mediante el puerto serie. LabVIEW requiere de unos tiempos de espera para poder transmitir correctamente usando esta interfaz. Si se transmitía demasiado rápido sin respetar las pausas la comunicación se interrumpía y el sistema fallaba.

Al final se logró solventar este grave problema tras muchas pruebas usando diferentes lapsos de tiempo entre envíos. No fue sencillo puesto que había que lograr que el sistema no fallase y al mismo tiempo dispusiésemos de una velocidad adecuada para transmitir los subtítulos lo suficientemente rápido.

- Prueba de Consumo

Cuando se alimentaba todo el circuito empleando una fuente de alimentación de laboratorio se pudo observar que el consumo era de 120 mA con una tensión de alimentación de 3.7V.

Para lograr que el receptor funcione de forma autónoma se usan 3 baterías recargables de formato AAA ( $3 \times 1.2V = 3.6V$ ) con capacidad de 1100mAh. Teniendo en cuenta todos estos datos obtenemos una autonomía teórica aproximada de 9 horas. Dicha autonomía es más que suficiente para visionar una película.

- Prueba de Alcance

Se realizaron pruebas en el Parque Tecnológico donde se encuentra el CESyA para ver cuál era un alcance máximo del enlace ZigBee. Se comprobó que en una situación donde hubiese línea de visión directa los subtítulos se seguían recibiendo correctamente a una distancia de 40 metros.

El alcance en un cine podría ser incluso superior a este dato, con algunas pequeñas modificaciones del diseño. Si se sustituye la antena omnidireccional que viene con el kit por una más directiva, que apunte exclusivamente al público, la señal sería recibida con mayor intensidad y por lo tanto se presupone que el alcance será aún mayor.

### *11.1 Resultados académicos*

Con parte del trabajo realizado en este proyecto se presentó un Poster en representación del CESyA durante el AMADIS 2009 celebrado el 19 y 20 de Junio en Pamplona.

En dicho Poster se realizó una breve explicación sobre qué es ZigBee y algunas de sus características más importantes a modo divulgativo. Al mismo tiempo se explicaron varios proyectos del CESyA que emplean dicha tecnología inalámbrica, como las gafas de subtítulo cerrado explicadas en este documento y GEVAM (Guía Virtual Accesible para Museos), que tiene como objetivo el hacer accesible la visita a los museos a todas las personas, tanto las que presenten algún tipo de discapacidad como las que no.

# CAPÍTULO

## 12

---

### *Planificación del trabajo y presupuesto*

*12.1 Planificación del trabajo*

*12.2 Presupuesto*

*12.3 Conclusiones*





## 12. PLANIFICACIÓN DEL TRABAJO Y PRESUPUESTO

### *12.1 Planificación del trabajo*

Para llevar a buen término el desarrollo del prototipo debieron realizarse diferentes trabajos. Algunos de ellos se hicieron en cascada uno tras otro y otros se llevaron a cabo en paralelo.

Las tareas que se realizaron para el desarrollo completo del proyecto fueron las siguientes:

- Estudio de los estándares inalámbricos existentes en el mercado y elección del más conveniente para la aplicación (Se escogió ZigBee): 3 semanas
- Estudio de las plataformas con tecnología ZigBee ofrecidas por los fabricantes y elección de la más adecuada (Fue elegido el CC2430DK de TI): 3 semanas
- Estudio del funcionamiento de la plataforma CC2430 (hardware, Z-Stack, herramientas de programación, etc.): 8 semanas
- Estudio de los diferentes tipos de tarjetas de video disponibles y decisión sobre cuál emplear (Se optó por la BOB-4S): 3 semanas
- Análisis sobre visores del tipo Head-Up Display (Teleglass T3-F): 3 semanas
- Escribir el código en lenguaje C para el enlace ZigBee, revisión del código, pruebas empleando placas SmartRF04EB, etc.: 6 semanas
- Escribir el código en LabVIEW, revisión del código, pruebas, etc.: 10 semanas
- Diseño del circuito y pruebas con placa protoboard: 3 semanas
- Diseño y elaboración de las 2 placas de circuito: 3 semanas
- Montaje del prototipo final y pruebas definitivas: 2 semanas
- Redacción de la memoria, análisis de resultados, conclusiones, preparación de la presentación, etc.: realizado en paralelo durante todo el proceso.

Para dar una visión más gráfica de todo lo enunciado se ha creado la Tabla 12.1, que muestra la planificación dividida por meses de manera visual:

	Meses										
Tareas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Estándares											
Plataformas											
Estudio CC2430											
Tarjeta de video											
Visor											
Código ZigBee											
Código LabVIEW											
Protoboard											
Diseño PCB											
Montaje final											
Memoria											

Tabla 12.1: Esquema de planificación

Como se observa, hay tareas que se entrecruzan y que se llevan a término en paralelo. Mientras realizamos el estudio de los estándares para comunicaciones inalámbricas era inevitable que cuando ya se tenía decidido qué estándar iba a adoptarse ya se estuviese haciendo un estudio más a fondo de ese estándar.

Lo mismo pasa durante la elección de la plataforma. Cuando se analizaron las plataformas existentes, es decir, mientras se miraban las especificaciones del hardware que implementa el estándar adoptado, estábamos valorando la plataforma que utilizaríamos.

Algo idéntico sucede cuando al estudiar la plataforma se van haciendo pruebas sobre el hardware para comprobar que se asimila la información extraída de los manuales y ver como se realiza en la práctica.

A la vez que se hacen todos estos procesos, paralelamente se redacta toda la documentación. Sin embargo, esta documentación no se puede acabar hasta que se dan por finalizadas todas las otras tareas, puesto que dentro de la memoria han de aparecer los resultados y las conclusiones extraídas de todo el trabajo y, cómo no, preparar la presentación como resumen del proyecto.

Ésta es la planificación seguida de una forma aproximada puesto que en algunas ocasiones hubo contratiempos. Uno de ellos consistió en que el período de entrega del CC2430DK fue superior a 4 semanas y, por lo tanto, desde que seleccionamos qué plataforma utilizaríamos hasta que la llegamos a tener en las manos pasó mucho tiempo. Durante este tiempo de espera se siguió con la planificación establecida (leer la literatura sobre Z-Stack de Texas Instruments, análisis del manual de funcionamiento de la plataforma, etc.).

## ***12.2 Presupuesto***

### ***12.2.1 Horas invertidas***

Hay que remarcar que antes del inicio de este proyecto el autor de este trabajo tenía una experiencia muy escasa en el uso de la mayoría de los programas de software que han sido empleados. En este grupo de programas se encontrarían LabVIEW, Z-Stack de Texas Instruments e IAR Workbench. Con otro tipo de software como por ejemplo OrCAD Layout Plus, programación en lenguaje C o manejo de bases de datos SQL sí que poseía cierta experiencia aunque siempre hubo que refrescar ciertos aspectos algo olvidados.

El tiempo de desarrollo del proyecto (desde que se empezó, hasta la redacción completa de la memoria) ha sido de 11 meses aproximadamente. Durante todo este tiempo se han realizado las tareas descritas en el apartado anterior. La valoración de las horas invertidas no es del todo exacta puesto que la dedicación no ha sido exclusiva a esta tarea en algunas ocasiones, debiendo compaginarse con algunas obligaciones que surgían en el CESyA. Contando una dedicación de 4 horas diarias de lunes a viernes durante 11 meses, en total se han invertido 880 horas. Dado que se partía de una base de conocimientos muy reducida sobre el tema, tampoco es una inversión de tiempo excesiva teniendo en cuenta todo el que se ha realizado.

### ***12.2.2 Mano de obra***

Suponiendo un sueldo de 38.400€ brutos anuales para un trabajador con dedicación de 8 horas al día obtenemos un coste de mano de obra de 20€ brutos/hora.

En este proyecto el tiempo total de dedicación asciende a 880 horas (11 meses, 4 horas/día, 5 días de la semana).

El coste total de la mano de obra sería  $880 \times 20 = 17.600\text{€}$

### ***12.2.3 Precio del material***

Para desarrollar el proyecto hubo que adquirir diversos componentes como el kit CC2430DK de Texas Instruments que tiene un precio de 430€. Además del kit se compró la tarjeta de video BOB-4 a un precio de 70€ y las gafas de Teleglass T3-F 975€. Otros componentes tales como interruptores, botones, resistencias, LEDs, baterías recargables, etc. supusieron un coste de alrededor de 60€.

### ***12.2.4 Coste total***

A continuación se adjunta la Tabla 12.2 donde se detallan los costes del proyecto y se calcula a cuánto ascendería el total.

Descripción	Cantidad (€)
Mano de obra	17.600
Kit CC2430DK	430
Gafas Teleglass T3-F	975
Tarjeta de video BOB-4S	70
Otros componentes, placas de cobre, etc.	60
<b>Total</b>	<b>19.135</b>

Tabla 12.2: Presupuesto

### 12.3 Conclusiones

Tanto el tiempo invertido como el coste material no son en ningún caso desproporcionados. Hay que tener presente que los 19.135€ serían el coste total de desarrollo del producto. En este precio no están incluidos los costes de las licencias del diferente software de desarrollo usado, como por ejemplo es el caso de LabVIEW.

Si se deseara fabricar unidades en serie de estas gafas de subtítulo el precio unitario sería muchísimo menor teniendo en cuenta el factor de las economías de escala. Además, el número de componentes adquiridos para cada unidad producida en serie se reduciría respecto al prototipo. Por ejemplo, no sería necesario comprar un kit CC2430DK completo, solamente necesitaríamos un módulo CC2430EM cuyo valor no supera los 60€. Lo mismo sucede con las placas de cobre. Para el prototipo se hicieron dos modelos diferentes y si se decidiese su fabricación únicamente se construiría una placa.

# **CAPÍTULO**

## **13**

---

### ***Conclusiones***



## 13. CONCLUSIONES

Se ha logrado cumplir el propósito de este trabajo como era mejorar las prestaciones de las gafas de subtítulo.

El objetivo principal que era sustituir el enlace radio se ha conseguido de forma exitosa. El protocolo propietario usado para el enlace radio de las antiguas gafas ha dado paso a un enlace ZigBee con mayor velocidad de envío de datos, menor retardo y que, al mismo tiempo, aporta una capacidad de transmisión simultánea a un número mucho mayor de usuarios (hasta 254 nodos). Gracias a esto es posible enviar subtítulos a toda la audiencia que se encuentra en la sala, algo que antes era impensable.

Además de ZigBee se consideraron otras tecnologías como son Wi-Fi y Bluetooth para sustituir el protocolo propietario en el enlace radio. A pesar de que Wi-Fi y Bluetooth ofrecen unas prestaciones superiores, principalmente a lo que concierne a la tasa de datos, la elección de ZigBee ha sido un gran acierto tal y como se ha podido comprobar después.

Si se hubiese tomado partido por alguna de las otras dos opciones habríamos desaprovechado recursos en cuanto a capacidad de transmisión pagando además un alto precio en consumo y, por tanto, en autonomía.

ZigBee se adapta mejor a nuestras necesidades, especialmente en lo referente a que no necesitamos una velocidad de transmisión muy alta y en que tiene unas demandas de corriente muy bajas. También es la tecnología que más nodos puede tener en una misma subred con una amplia diferencia respecto a las otras.

Tras comparar numerosos kits de desarrollo ZigBee se optó por CC2430DK. Si bien era el más caro de todos, era el que cumplía todos los requisitos establecidos, principalmente en el apartado de tamaño, al tener sus módulos de evaluación unas reducidísimas dimensiones.

Otra característica que no pudo apreciarse en la comparativa pero que cuando se pasó al diseño del software se manifestó, fue la existencia de una comunidad de usuarios que utiliza este kit. El que hubiese un foro en Internet promovido por Texas Instruments para los compradores de su producto fue clave. Esto resultó de gran ayuda cuando se afrontaron algunos problemas con la pila Z-Stack ya que otros diseñadores habían tenido las mismas dudas y resultaba más rápido hallar la respuesta.

La decisión de usar el módulo CC2430EM, que integra en el mismo chip la capacidad inalámbrica ZigBee con un procesador 8051 mejorado, ha permitido la sustitución de la parte dedicada a transmisión vía radio y de la placa hija dedicada exclusivamente a la MCU.

El resultado es un tamaño más reducido (Figura 13.1) y unas prestaciones superiores en lo que respecta a potencia de cálculo y consumo así como la tasa de datos disponible entre la estación principal y el receptor.



Figura 13.1: Comparación de tamaños entre el primer prototipo y el nuevo

El empleo del kit CC2430DK también tiene algún punto negativo. Un handicap derivado de su uso reside en que para transmitir la información de la estación principal a la placa SmartRF04EB hay que usar obligatoriamente el conector RS-232 disponible para el puerto serie del PC.

Esto puede ser un problema, ya que algunas máquinas, principalmente portátiles, ya no disponen de este conector y es por ello que no tendremos la posibilidad de conectarlo a no ser que se disponga de un cable conversor del tipo USB-Serie. El precio de este cable no es muy elevado pero sí que resulta molesto el hecho de tener que transportarlo. Otra solución sería adquirir un módulo ZigBee con conector USB.

Sobre qué tipo de tarjeta de vídeo sería usada en el prototipo se optó por usar la tarjeta BOB-4S a la espera de la salida de la tarjeta BOB-6, con grandes mejoras, como mayor resolución, caracteres en color, etc.

Respecto al tema del visor, las gafas Teleglass T3-F empleadas aportan grandes mejoras. La calidad de imagen es superior, el enfoque es mejor y las letras se ven más nítidas respecto al antiguo prototipo.

Sin embargo, no todo son ventajas. Este visor ocupa una mayor superficie, por lo que sólo será el ojo izquierdo el que vea la pantalla del cine cuando se esté usando el visor dado que éste no es del tipo See-Through. Esto puede apreciarse en la imagen de la Figura 13.2.





Figura 13.2: Visor Teleglass T3-F en funcionamiento

Afortunadamente, gracias a la capacidad de poder desplegar o retraer el visor usando el motor eléctrico en parte se puede solventar este problema, aunque lo deseable en un futuro es lograr un resultado como el ilustrado en la Figura 13.3.



Figura 13.3: Objetivo a alcanzar

Otro detalle negativo sobre el visor T3-F es que no transmite una sensación de robustez muy grande, y las gafas deben ser tratadas con especial cuidado. El hecho de disponer de partes móviles en el visor hace pensar que un uso prolongado puede provocar que este mecanismo acabe fallando.

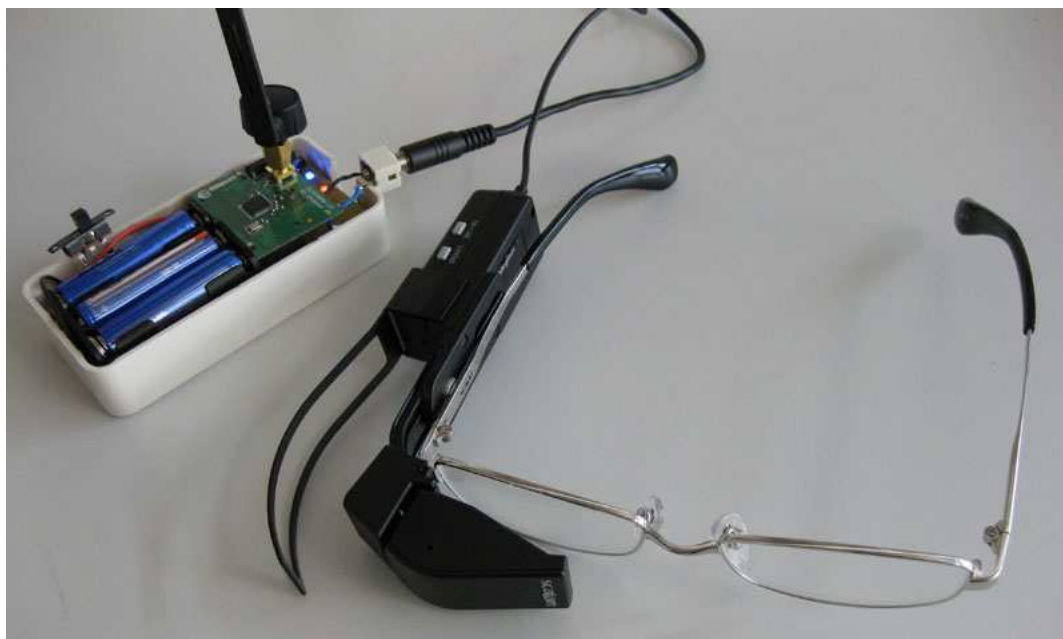


Figura 13.4: Sistema portátil compuesto por receptor y gafas

Además de las metas propuestas, se han conseguido otras, como lograr que el receptor sea capaz de trabajar realmente de forma autónoma gracias al uso de baterías recargables.

El código en lenguaje C del enlace ZigBee fue programado sobre la pila Z-Stack. Incluye la inicialización de la tarjeta de vídeo, la configuración del puerto serie y los comandos necesarios para recibir y transmitir a través de él. También se hace uso de interrupciones para el manejo del botón, configuración de pines I/O e implementación de un algoritmo automático para saber cuántos idiomas se están recibiendo. Para lograr todo esto se ha hecho necesario el uso de manejadores de eventos y timers.

En cuanto al código en LabVIEW del programa principal, hay que destacar que ha sufrido intensas modificaciones respecto al que había sido usado en el antiguo prototipo. Se ha simplificado el código y al mismo tiempo se han solventado algunos errores críticos que existían. También se ha separado la parte de vídeo de la parte de subtítulos, en un intento por simular el esquema propuesto de cine donde el programa principal recibe periódicamente del sistema de proyección el instante de la película que se está reproduciendo.

Un objetivo secundario que hubiese sido deseable conseguir habría sido el de poder presentar los subtítulos en diferentes colores. El visor es capaz de mostrar imágenes en color pero dado que la tarjeta de video BOB-4S únicamente puede generar gráficos en blanco y negro o escala de grises esta idea fue abandonada rápidamente.

# CAPÍTULO

## 14

---

### *Mejoras futuras*

*14.1 Mejoras Hardware*

*14.2 Mejoras Software*

*14.3 Otras aplicaciones: Uso combinado de gafas con reconocedores de voz*



## 14. MEJORAS FUTURAS

Si bien se ha logrado aumentar las prestaciones que tenía aquel primer prototipo desarrollado por investigadores del CESyA, este último prototipo de gafas puede ser mejorado de diversas formas:

### *14.1 Mejoras Hardware*

- Visor

Como ya se ha apuntado antes, el aspecto más mejorable es sin duda el visor a emplear. El visor idóneo debería mostrar los subtítulos y al mismo tiempo permitir ver a través de él disponiendo de verdadera capacidad See-Through.



Figura 14.1: Grados de transparencia de una pantalla OLED

Gracias a la aparición de nuevas tecnologías para presentación de imágenes como las pantalla OLED este objetivo está más cerca de conseguir para el mercado de consumo general. Como muestra de los resultados que se obtienen con este tipo de pantallas tenemos las Figuras 14.1 y 14.2. Con la tecnología OLED que está empezando a introducirse lograr esto a un precio asequible seguramente será una realidad en no demasiado tiempo.



Figura 14.2: Prototipo de pantalla OLED con capacidad See-Through

- Tarjeta de video

Como ya se comentó en el apartado dedicado a la búsqueda y comparación de tarjetas de video para este proyecto, una posible mejora sería la sustitución de la tarjeta de video BOB-4S por la nueva tarjeta BOB-6 que está previsto que pueda adquirirse desde finales de 2009 y que dispondrá de caracteres a color y una mayor resolución.

- Enlace ZigBee

El tamaño de la antena que viene con el kit es relativamente grande. Una opción de mejora sería adquirir una de menores dimensiones e incluso barajar la posibilidad de diseñar una más pequeña.

También es muy importante mencionar que a finales de mayo de este año 2009 Texas Instruments lanzó al mercado un nuevo modelo de chip con tecnología ZigBee, el CC2530, con algunas mejoras respecto al CC2430 empleado en este proyecto. Además, en el nuevo kit de desarrollo se incluye un lápiz USB con capacidad ZigBee cuya memoria flash puede ser programada a nuestra voluntad.

Usando este dispositivo USB, similar al de la Figura 14.3, se conseguiría reducir el tamaño en el transmisor en gran medida, dado que en el prototipo actual se emplea una placa SmartRF04EB conjuntamente con un módulo CC2430EM.



Figura 14.3: Lápiz USB con chip ZigBee CC2530

## 14.2 Mejoras Software

Existen algunas ideas que permitirían poder usar todo el sistema en un escenario muy realista como sería un complejo de salas de cine. Una de estas mejoras significativas no sería excesivamente complicada y consistiría en lo siguiente.

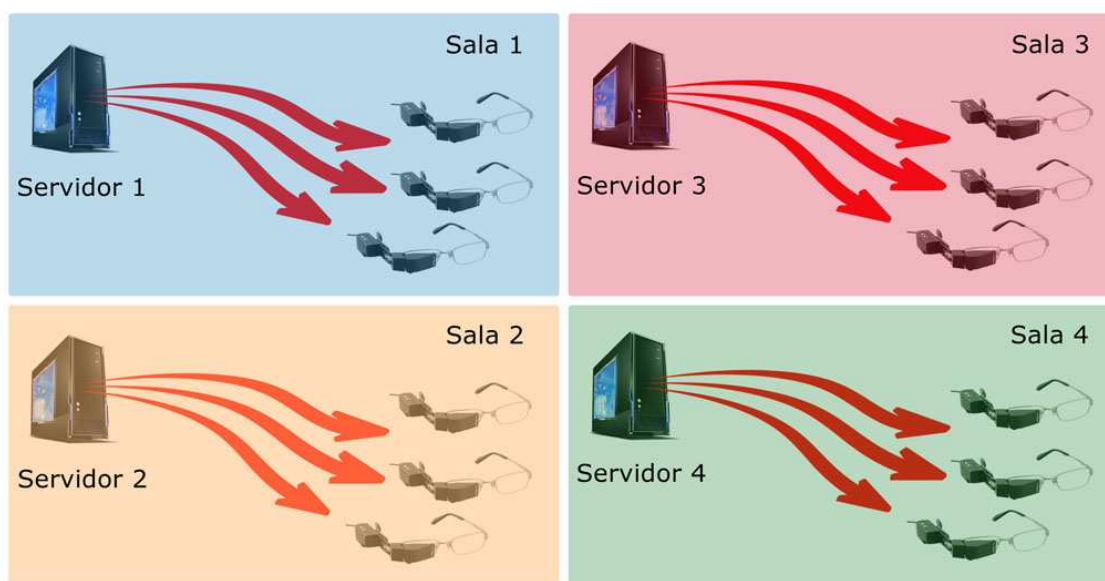


Figura 14.4: Estructura al tener diferentes salas

La estructura de un cine está basada principalmente en disponer de distintas salas en donde se emiten al mismo tiempo películas diferentes. Para adaptarse a esto se podría dotar a cada sala con un servidor ZigBee y hacer que cada uno de estos servidores tenga asignado una PAN ID fija distinta como en el esquema de la Figura 14.4.

Los usuarios, a través de un menú que aparecería en las gafas, tendrían la posibilidad de seleccionar el servidor al que quieren conectarse dependiendo de su sala. Una vez han realizado la petición pasan a seleccionar el idioma de visionado de la película que se emite en la sala donde se encuentran.



### *14.3 Otras aplicaciones: Uso combinado de gafas con reconocedores de voz*

Si bien la idea no sería nueva, existe la posibilidad de aprovechar gran parte del sistema desarrollado en conjunto con algún tipo de reconocedor de voz.

Un ejemplo de uso sería el que se ilustra en la Figura 14.5, utilizándolo mientras se imparte una clase de idiomas como instrumento de ayuda a los alumnos que así lo requieran o deseen.



Figura 14.5: Empleo en un aula de idiomas

En dicha clase, el profesor que impartiese la lección llevaría un micrófono. A través de ese micrófono su voz se transmite a un ordenador con un software de reconocimiento de voz. Una vez que la voz se ha convertido en subtítulos estos son enviados a las gafas de los alumnos que dispongan de ellas. Todo este esquema puede verse en la Figura 14.6.





Figura 14.6: Esquema propuesto

Estos subtítulos pueden resultar útiles a aquellos alumnos que tengan dificultades para seguir la clase o no logren entender algunas palabras del profesor. Los subtítulos les darían la posibilidad de leer lo que dice el profesor sin interrumpir en mitad de la clase o quedar descolgados.



# **CAPÍTULO**

## **15**

---

### ***Bibliografía***



## 16. BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

- [1] FIAPAS Confederación Española de Familias de Personas Sordas [Página Web]  
<http://www.fiapas.es/FIAPAS/queeslasordera.html> (Junio 2009)
- [2] Instituto Valenciano de la Sordera [Página Web]  
<http://villarinox.com/noticias/not276889.htm> (Junio 2009)
- [3] Ministerio de Sanidad y Política Social “Accesibilidad Universal” [Página Web]  
<http://www.mepsyd.es/politica-social/discapacidad/informacion/accesibilidad-universal.html> (Julio 2009)
- [4] “Sistemas de accesibilidad al cine y a la educación para personas con discapacidad auditiva”. Autor: Javier Jiménez Dorado. [Proyecto Final de Carrera]
- [5] “Subtitulado cerrado en entornos de ocio y educacionales para personas con discapacidad auditiva: Estudio, diseño y fabricación”. Autor: Pablo Revuelta Sanz. [Proyecto Final de Master]
- [6] “Nokia's Wibree and the Wireless Zoo” [Página Web]  
<http://thefutureofthings.com/articles/38/nokias-wibree-and-the-wireless-zoo.html>  
(Noviembre 2008)
- [7] Artículo sobre Wi-Fi [Página Web]  
<http://es.kioskea.net/contents/wifi/wifiintro.php3> (Diciembre 2008)
- [8] Características Adaptador OEM USB Wi-Fi 802.11bg [Página Web]  
<http://www.wimacom.com/tienda/oemw54usb04rs300-adaptador-wireless-300mw-antena-5dbi-p-701.html> (Diciembre 2008)
- [9] Atheros “Single-Chip 802.11g Solution Lowers Cost of Wi-Fi in DSL Routers and Other Carrier Gateways” [Página Web]  
<http://www.analogzone.com/netp042307.htm> (Diciembre 2008)
- [10] Radio Bluetooth (RF) [Página Web]  
<http://www.electronicafacil.net/tutoriales/Radio-Bluetooth-RF.html> (Noviembre 2008)
- [11] Bluetooth and power consumption: issues and answers [Página Web]  
[http://mobiledevdesign.com/hardware\\_news/radio\\_bluetooth\\_power\\_consumption/](http://mobiledevdesign.com/hardware_news/radio_bluetooth_power_consumption/)  
(Diciembre 2008)
- [12] Foro Nokia: “Bluetooth Protocol” [Página Web]  
[http://wiki.forum.nokia.com/index.php/Bluetooth\\_Protocol](http://wiki.forum.nokia.com/index.php/Bluetooth_Protocol) (Diciembre 2008)
- [13] Artículo sobre Bluetooth [Página Web]  
<http://es.kioskea.net/contents/bluetooth/bluetooth-intro.php3> (Diciembre 2008)

- [14] ZigBee Alliance [Página Web]  
<http://www.zigbee.org> (Enero 2009)
- [15] Introducción a 802.15.4 y ZigBee. Autor: William Wallace [Documento Word]
- [16] “Microchip PICDEM Z Development Kit” [Página Web]  
[http://www.microchip.com/stellent/idcplg?IdcService=SS\\_GET\\_PAGE&nodeId=1406&dDocName=en021925&part=DM163027-2](http://www.microchip.com/stellent/idcplg?IdcService=SS_GET_PAGE&nodeId=1406&dDocName=en021925&part=DM163027-2) (Enero 2009)
- [17] “Hands-On ZigBee: Implementing 802.15.4 with Microcontrollers”. Autor: Fred Eady. Editorial: Newnes [Libro de texto]
- [18] “Silicon Labs 802.15.4-2.4-DK” [Página Web]  
<http://www.silabs.com/products/mcu/zigbeemcu/Pages/default.aspx> (Enero 2009)
- [19] “OKI ZigBee Development Kit” [Página Web]  
<http://www2.okisemi.com/site/products/catalog/Zigbee/ZigbeezNED.html> (Enero 2009)
- [20] “Texas Instruments CC2430DK” [Página Web]  
<http://focus.ti.com/docs/toolsw/folders/print/cc2430dk.html> (Enero 2009)
- [21] “ZigBit Development Kit User’s Guide” [Documento PDF]  
<http://www.meshnetics.com/dl.php?id=11> (Enero 2009)
- [22] “RCM4500W Development Kit” [Página Web]  
<http://www.rabbit.com/products/rcm4500W/> (Enero 2009)
- [23] Manual Tarjeta de vídeo BOB4 [Documento PDF]  
[www.decadenet.com/bob4/B4AppGuide.pdf](http://www.decadenet.com/bob4/B4AppGuide.pdf) (Marzo 2009)
- [24] Teleglass T3-F [Página Web]  
[http://techon.nikkeibp.co.jp/english/NEWS\\_EN/20070522/132925/](http://techon.nikkeibp.co.jp/english/NEWS_EN/20070522/132925/) (Junio 2009)
- [25] “A True System-on-Chip solution for 2.4 GHz IEEE 802.15.4 / ZigBee” [Documento PDF]  
<http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/cc2430.pdf> (Febrero 2009)
- [26] Z-Stack de Texas Instruments [Página Web]  
<http://focus.ti.com/docs/toolsw/folders/print/z-stack.html> (Marzo 2009)
- [27] “Desenvolupament d’una xarxa de sensors i actuadors sense fils de propòsit industrial”. Autor: Xavier López Puig. [Proyecto Final de Carrera]
- [28] Herramienta de diseño LabVIEW [Página Web]  
[www.ni.com/labview/](http://www.ni.com/labview/) (Abril 2009)